

İleri Malzeme Teknolojileri, Eklemeli İmalat ve Kompozit Sistemler



BİDGE Yayınları

İleri Malzeme Teknolojileri, Eklemeli İmalat ve Kompozit Sistemler

Editör: HASAN KÖTEN

ISBN: 978-625-8567-91-5

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İleri Malzeme Teknolojileri, Eklemeli İmalat ve Kompozit Sistemler

Önsöz

Malzeme bilimi ve mühendislik uygulamaları, günümüzde sanayinin hemen her alanında teknolojik ilerlemenin temel itici gücü konumundadır. Gelişen üretim teknikleri, artan performans beklentileri, sürdürülebilirlik gereksinimleri ve çok disiplinli mühendislik yaklaşımları; geleneksel malzemelerin yeniden değerlendirilmesini ve yeni nesil malzemelerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, modern mühendislik problemlerine çözüm üreten akademik çalışmaların bir araya getirilmesi, bilgi birikiminin sistematik biçimde paylaşılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kitap, katı yağlayıcılardan metal ve polimer esaslı kompozitlere, eklemeli imalattan biyomalzemelere, ileri karakterizasyon tekniklerinden sayısal analiz yöntemlerine kadar geniş bir yelpazede güncel ve özgün çalışmaları bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. Kitapta yer alan bölümler; hem temel bilimsel prensipleri hem de endüstriyel uygulamaları ele alarak, teorik bilgi ile pratik mühendislik çözümleri arasında güçlü bir köprü kurmaktadır. Eserde; molibden disülfür gibi ileri katı yağlayıcıların özelliklerinden, farklı malzemelerden üretilmiş bağlantı elemanlarının mekanik performanslarının karşılaştırılmasına; eklemeli imalat teknolojilerindeki güncel eğilimlerden, sürdürülebilir ve doğal fiber takviyeli kompozitlere kadar pek çok konu kapsamlı biçimde incelenmiştir. Bunun yanı sıra, balistik malzemeler, biyomalzeme uygulamalarında paslanmaz çelikler, alüminyum ve nikel esaslı alaşımlar, ultrasonik muayene teknikleri ve ileri CFD analizleri gibi alanlara yönelik çalışmalar da kitapta yer almaktadır. Bu çeşitlilik, kitabın hem akademisyenler hem de sanayi araştırmacıları için önemli bir başvuru kaynağı olmasını hedeflemektedir. Bu kitabın, lisansüstü öğrenciler, akademisyenler, Ar-Ge mühendisleri ve sektörde çalışan profesyoneller için yol gösterici bir kaynak olacağına inanıyoruz. Bölüm yazarlarının özverili çalışmaları sayesinde ortaya çıkan bu eser, malzeme mühendisliği ve ilişkili disiplinlerde yapılacak yeni araştırmalara ilham vermeyi amaçlamaktadır. Bu vesileyle, değerli bilimsel katkılarıyla kitabın oluşumuna emek veren tüm yazarlara, hakemlere ve yayıma hazırlık sürecinde destek sağlayan herkese içten teşekkürlerimizi sunarız. Kitabın, bilimsel literatüre kalıcı bir katkı sağlamasını ve mühendislik alanında çalışan tüm paydaşlara faydalı olmasını temenni ederiz.

Prof. Dr. Hasan KÖTEN
Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

İÇİNDEKİLER

KATI YAĞLAYICILARDAN MOLİBDEN DİSÜLFÜR (MOS2)	1
<i>FERHAT BÜLBÜL</i>	
FARKLI MALZEMELERDEN ÜRETİLMİŞ CIVATA TİPLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	37
<i>HAYAT SILA VELİ, KAAAN YER, FARSHİD KHOSRAVİ</i>	
EKLEMELİ İMALATTA YENİ YAKLAŞIMLAR VE EĞİLİMLER	61
<i>MAHMUT ÖZER</i>	
TERMOPLASTİK ÇEKİRDEKLİ SANDVİÇ KOMPOZİT KİRİŞ VE PANELLERİN MEKANİK KARAKTERİZASYONU	80
<i>UĞUR ÖZMEN, KEMAL AYAN</i>	
POLİVİNİL ALKOL (PVA): TARİHSEL GELİŞİM, YAPISAL ÖZELLİKLER VE MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI	99
<i>UĞUR ÖZMEN, KEMAL AYAN</i>	
BİYOBOZUNUR METALLERİN EKLEMELİ İMALATINDA GÜNCEL GELİŞMELER	123
<i>FURKAN CENGİZ</i>	
ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLMİŞ SÜREKLİ FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT KAFES YAPILARIN MEKANİK İNCELENMESİ	145
<i>GAMZE SAKAOĞLU, FARSHİD KHOSRAVİ</i>	
SÜRDÜRÜLEBİLİR KOMPOZİT MALZEMELER İÇİN DOĞAL FİBERLER	158
<i>MEHMET ÇAĞRI TÜZEMEN</i>	
POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERDE ULTRASONİK MUAYENENİN UYGULANABİLİRLİĞİ	177
<i>CENAP GÜVEN, RÜYA AKINCI</i>	

BALİSTİK MALZEMELER	190
---------------------------	-----

MERYEM İPEK, İLYAS KARTAL

PASLANMAZ ÇELİKLERİN BİYOMALZEME UYGULAMALARI: KAPSAMLI BİR ARAŞTIRMA	210
--	-----

NACİ KURGAN

ALÜMİNYUM MALZEMELERİN KAYNAKLA BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNE GENEL BAKIŞ	253
--	-----

BERKAN KARAKAYA, İBRAHİM KARAAĞAÇ, MEHMET YASİN DEMİREL, ZÜBEYDE

RF-ICP PLAZMA TABANLI TOZ KÜRELEŞTİRME TEKNOLOJİSİ	297
---	-----

İRFAN ÜNAL, RAHMİ ÜNAL

NİKEL ESASLI ALAŞIM VE KOMPOZİTLER	315
--	-----

FEVZİ KELEN

Racing Drone Pervanelerinde Hipotetik Çelik Malzeme Kullanımının Aerodinamik Etkilerinin Sst K- ω Modeli Ile Cfd Analizi	335
---	-----

MEHMET AKİF KARTAL

Racing Drone Pervanelerinde Çelik Malzemenin Aerodinamik Performansa Etkisinin Cfd Ile Incelenmesi: K- ϵ Realizable Modeli Kullanılarak Bir Hipotetik Analiz	346
---	-----

MEHMET AKİF KARTAL

BÖLÜM 1

KATI YAĞLAYICILARDAN MOLİBDEN DİSÜLFÜR (MoS₂)

FERHAT BÜLBÜL¹

Giriş

Yağlayıcılar, tarihsel olarak ağırlıklı biçimde bitkisel ve hayvansal kökenli maddelerden elde edilmiştir. Yağlayıcıların kullanımına ilişkin en dikkat çekici tarihsel örneklerden biri, M.Ö. üçüncü binyılda Mısır piramitlerinin inşası sırasında görülmektedir. Bu yapılarda, ince ve yapışkan bir tabaka hâline getirilen, hidratlı kalsiyum sülfat (jips) esaslı bir harç kullanılmıştır. Söz konusu harcın, son derece büyük taş blokların kontrollü ve düzgün bir biçimde yerleştirilmesini kolaylaştırdığı bilinmektedir. Bu uygulama, triboloji biliminin ve yağlayıcı kullanımının insanlık tarihinin çok erken dönemlerine kadar uzandığını açıkça göstermektedir (Nosonovsky, 2007).

Grafitin kaygan yapısı ve karakteristik görünümü uzun zamandır bilinmekle birlikte, katı bir yağlayıcı olarak sistematik biçimde kullanımı muhtemelen Orta Çağlara dayanmaktadır. Grafit, tarihsel süreçte “siyah kurşun” ya da *plumbago* olarak da

¹ Prof. Dr, Erzurum Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-3060-1619

adlandırılmıştır. Özellikle molibdenit gibi benzer fiziksel özellikler sergileyen minerallerle uzun süre karıştırılmış, hatta aynı isim altında anılmıştır. Grafitin ayrı bir malzeme olarak sınıflandırılması ancak 1556 yılında mümkün olabilmektedir (Kazuhisa Miyoshi, 2001).

1179 yılında karbonun oksitlenerek karbondioksit oluşturduğunun anlaşılması, karbonun bilimsel açıdan daha fazla ilgi görmesine neden olmuştur (Wisniak, 2010). Bunu takiben, 1564 yılında İngiltere'deki Borrowdale madenlerinde yapılan kazılar, kalem üretimi amacıyla grafit elde edilmesini sağlamıştır. İlk kalemler, grafitin kalın tabakalar hâlinde kesilerek yarılmış ahşap kamalar içine yerleştirilmesi ve dıştan kılıflanması yoluyla üretilmiştir. “Grafit” terimi ise, Werner tarafından 1789 yılında, Yunanca “yazmak” anlamına gelen *graphein* kelimesinden türetilerek literatüre kazandırılmıştır (Kazuhisa Miyoshi, 2001; Owuor et al., 2020).

Molibdenitin cevher hâlinde Antik Yunan döneminden itibaren bilindiği, ancak uzun süre grafit ve kurşun ile birlikte anıldığı bilinmektedir. Bu adlandırma da yine Yunanca'da “kurşun” anlamına gelen kökten türetilmiştir (Lide, 1998). Katı yağlayıcılar üzerine gerçekleştirilen ilk önemli teknik çalışmalar, 1829 yılında Rennie tarafından yapılmış; bu çalışmalarda, yağlayıcı olarak kullanılan çeşitli katı malzemelerin sürtünme katsayıları deneysel olarak ölçülmüştür (Dowson, 1979; Rennie, 1829). 19. yüzyıl itibarıyla ise metal işleme uygulamalarında farklı türlerde katı yağlayıcıların yaygın biçimde kullanılmaya başlandığı görülmektedir (Kazuhisa Miyoshi, 2001).

Molibden, yerkabuğunda çoğunlukla molibdenit (MoS_2) minerali formunda yaygın bir dağılım göstermektedir. Bu mineralin en önemli ticari kaynaklarından biri, ince dağılmış cevher içeren grafitli oluşumlardan elde edilen ve Amerika Birleşik Devletleri'nin Kolorado eyaletinde yer alan Climax yatağıdır. Molibden disülfür (MoS_2), metalik siyaha çalan mavi-gri, diğer bir ifadeyle mavimtırak

kurşun grisi bir renge sahiptir (The Climax Molybdenum Deposit, Colorado, with a Section on History, Production, Metallurgy, and Development, 1933).

Katı yağlayıcılar, genellikle kuru çalışma koşullarında, izafi hareket hâlindeki iki katı yüzey arasında yağlama işlevi gören malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu malzemeler, harici bir sıvı ya da yarı katı yağlayıcı desteği olmaksızın, kayma sırasında düşük sürtünme katsayısı ve/veya düşük aşınma davranışı sergileyebilen maddelerdir. Katı yağlayıcılar özellikle düşük yüklemelerde, düşük kayma hızlarında ve yüksek sıcaklık koşullarında yağlama açısından avantaj sağlamaktadır. Uygulamada, bu malzemeler ya bir taşıyıcı ortam (yağ veya gres) ile karıştırılarak ya da bir bağlayıcı yardımıyla kaplama hâlinde; ayrıca sinterlenmiş metal veya polimer matrisler içerisine ilave edilerek kullanılabilir (C. Busch, 2006; Campbell, 1971; Scharf & Prasad, 2013; Sutor, 1991).

Günümüzde en yaygın kullanılan katı yağlayıcılar arasında grafit, molibden disülfür (MoS_2), tungsten disülfür (WS_2) ve politetrafloroetilen (PTFE) yer almaktadır. Katı yağlayıcıların bağlayıcı sistemler ile birlikte kullanımı yeni bir uygulamadır. Bağlanmış katı yağlayıcı kaplamalara ilişkin ilk patent, 1940'lı yılların ortalarında fosforik asit ile bağlanmış grafit film üzerine alınmıştır. Bunu izleyen süreçte, katı yağlayıcı malzemeler ve bağlayıcı sistemlere ilişkin yüzlerce patent literatüre kazandırılmıştır. Molibden disülfürün katı yağlayıcı olarak kullanımı 1940'lı yıllarda başlamış olup, sahip olduğu üstün tribolojik özellikler sayesinde diğer katı yağlayıcılara kıyasla daha geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Vazirisereshk et al., 2019). Teflon ticari adıyla bilinen PTFE ise, kimyasal olarak son derece soy (inert) bir yapıya sahip olup, bilinen en düşük sürtünme katsayısına sahip kuru yağlayıcı malzemelerden biridir (*Advanced Fluoropolymer Nanocomposites*, 2023; Dhanumalayan & Joshi, 2018).

Katı yağlayıcıların endüstriyel kullanımı, yeni bir uygulama alanı olarak değerlendirilmektedir. Uzay çalışmalarının başlamasına kadar, bu malzemelere yönelik sistematik ve kapsamlı araştırmalar oldukça sınırlı kalmıştır. 1950'li yıllarda jet motorlarının geliştirilmesiyle birlikte, yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek katı yağlayıcıların üretimine yönelik çok sayıda araştırma laboratuvarı kurulmuştur. Bu dönemde yürütülen çalışmaların büyük bölümü, katı yağlayıcılara istenen tribolojik ve termal özelliklerin kazandırılmasına odaklanmıştır. 1960'lı yıllarda ise yağlama davranışı üzerinde atmosfer koşullarının etkisi dikkate alınmış ve uzay ortamında katı yağlayıcıların performansları ayrıntılı olarak incelenmiştir (Kazuhisa Miyoshi, 2001; Kumar et al., 2022).

1970'li yılların başlarında, karşılaşılan problemlerin büyük bir kısmına çözüm önerileri geliştirilmiş ve katı yağlayıcıların kullanımına ilişkin sınırlamalar açıkça ortaya konulmuş olmasına rağmen, bu alandaki araştırmalar bir süre yavaşlamıştır. Ancak son yıllarda, gelişen ileri teknoloji uygulamalarıyla birlikte katı yağlayıcılar yeniden yoğun bir ilgi odağı hâline gelmiştir. Bu uygulamalara örnek olarak; düşük sıcaklıklarda itme üreten motorlara ait piston segmanları, gelişmiş gaz türbinleri için yağlama kafesleri, uzay mekanizmaları ve taşıtlarında uzun süreli dayanım gerektiren dişli ve yatak sistemleri, sıvı hidrojen ve oksijen ortamında çalışan turbo pompa yatak kafesleri, hafif alaşımlı dişli ve yatak sistemleri ile otomotiv ve sanayi makinelerinde kullanılan yatak uygulamaları gösterilebilir. Bu uygulamalarda öncelikli olarak talep edilen özellikler, uzun süreli dayanım ve geniş bir çalışma sıcaklığı aralığıdır (Grützmacher et al., 2025; Hedayati et al., 2024; Kazuhisa Miyoshi, 2001; Kumar et al., 2022; Sarma & Borah, 2025). Geliştirilen yeni nesil katı yağlayıcılar, bu gereksinimlerin büyük bir kısmını karşılayabilmektedir. Bununla birlikte, katı yağlayıcıların yaygın kullanım alanlarına rağmen belirli sınırlamalara sahip olduğu da bilinmektedir. Örneğin, MoS₂ yaklaşık

300 °C'nin altındaki sıcaklıklarda yüksek kararlılık sergilerken, bu sıcaklığın üzerinde hızla oksidasyona uğramaktadır. Grafit ise yaklaşık 425 °C'de oksidasyona başlamakta olup, etkin bir yağlayıcı olarak işlev görebilmesi için nemli bir ortam gerektirmektedir. PTFE ise nispeten yumuşak, organik bir malzeme olup, düşük yükleme ve düşük sıcaklık koşullarında kullanıma daha uygundur. Günümüzde, bu yaygın katı yağlayıcıların farklı bileşikler ve kompozit sistemler ile sentezlenerek daha üstün yağlama performanslarına ulaştırılabileceği genel kabul görmektedir (Bhat, 1993; Meng et al., 2018; Ouyang et al., 2022; Reeves et al., 2013; Vazirisereshk et al., 2019).

Bu çalışma, katı yağlayıcılar içerisinde endüstriyel ve bilimsel açıdan en yaygın kullanılan malzemelerden biri olan molibden disülfürün (MoS_2) tribolojik özelliklerini, yapısal karakteristiklerini ve üretim yöntemlerini kapsamlı bir bakış açısıyla ele almayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, öncelikle katı yağlayıcıların tarihsel gelişimi, kullanım gerekçeleri ve çalışma prensipleri incelenmiş; ardından MoS_2 'nin kristal yapısı, fiziksel–kimyasal özellikleri ve düşük sürtünme davranışının atomik kökenleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Çalışmanın devamında, MoS_2 'nin doğal cevherlerden elde edilmesinden ileri sentez ve kaplama tekniklerine kadar uzanan üretim yöntemleri sistematik biçimde sınıflandırılmış; her bir yöntemin sağladığı yapısal kontrol, ölçeklenebilirlik ve uygulama alanları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Son olarak, MoS_2 kaplamalarda mikroyapı, kristalografik yönlenme ve metal katkılarının sürtünme ve aşınma davranışı üzerindeki etkileri ele alınarak, güncel literatür ışığında endüstriyel uygulamalara yönelik tasarım kriterlerinin ortaya konulması hedeflenmiştir.

Katı yağlayıcılar ve Özellikleri

Katı yağlayıcılar, kayan veya yuvarlanan iki yüzey arasında sürtünme ve aşınmayı azaltmak amacıyla yüzeyler arasında yağlayıcı bir film oluşturabilen katı malzemeler olarak tanımlanır

(Campbell, 1971). Lansdown'a göre ise katı yağlayıcı; ince film ya da toz formunda, belirli bir yük altında temas eden yüzey malzemelerinden daha kolay kayma (kesme) gösterebilen herhangi bir katı malzemedir (Lansdown, 1982). Bu tanımlar, katı yağlayıcıların temel işlevinin, temas eden yüzeyler arasında düşük kesme dayanımına sahip bir ara tabaka oluşturarak sürtünmeyi azaltmak olduğunu ortaya koymaktadır.

Katı yağlayıcılar, özellikle sıvı yağların veya greslerin buharlaşma, oksidasyon, bozunma ya da radyasyon etkileri nedeniyle kullanılamadığı aşırı çalışma koşullarında tercih edilmektedir. Nükleer reaktörler, yüksek vakum ortamları, çok yüksek veya çok düşük sıcaklık aralıkları (yaklaşık -200°C ile 850°C arası), yüksek radyasyonlu ve korozyif atmosferler bu uygulamalara örnek teşkil etmektedir. Bu nedenle katı yağlayıcılar, aşırı servis koşullarında çalışan rulmanlar ve tribolojik sistemler için vazgeçilmez bir çözüm sunmaktadır. Bu malzemelerin büyük bir bölümü, tabakalı kristal yapıya sahiptir. Grafit, molibden disülfür (MoS_2), hekzagonal bor nitrür, kadmiyum iyodür ve boraks bu gruba giren tipik katı yağlayıcılardır. Örneğin grafitte, atomlar tabaka içinde güçlü kovalent bağlarla bağlanmışken, tabakalar arası etkileşim zayıf van der Waals bağları ile sağlanır. Kayma sırasında bu tabakalar kolaylıkla birbirinden ayrılarak karşıt yüzeylere tutunur ve hareket yönüne paralel şekilde hizalanır. Böylece tabakalar arasındaki zayıf bağlanma sayesinde düşük sürtünme elde edilirken, tabaka içindeki güçlü bağlar yük taşıma kapasitesi sağlayarak aşınmayı sınırlar (Abdelbary & Chang, 2023a, 2023b). Buna karşılık, kurşun ve çinko gibi yumuşak metalik katı yağlayıcılar, çok sayıda kayma düzlemine sahip olmaları, düşük pekleşme eğilimleri ve geniş sıcaklık aralıklarında düşük sürtünme sergilemeleriyle öne çıkar. Kayma sırasında oluşan dislokasyonlar ve nokta kusurları, sürtünme temasının termo-mekanik etkileriyle hızlı bir şekilde giderilebilmektedir (Erdemir, 2001).

Katı yağlayıcıların temel amacı, kayan yüzeyler üzerinde sürekli ve kararlı bir yağlayıcı film oluşturmaktır. Bu film, taban malzemeden daha sert ya da daha yumuşak olabilir ve mekanik, kimyasal, elektrokimyasal veya fiziksel yöntemlerle üretilebilir (Abdelbary & Chang, 2023b; Holmberg et al., 2000; Mang, 2006; Matthews et al., 2007). Etkili bir katı film yağlayıcının;

- Düşük kesme dayanımına,
- Uygulanan normal yüklere karşı yüksek basma dayanımına,
- Taban malzemeye güçlü adezyona,
- Kimyasal kararlılığa ve korozyon önleyici özelliğe sahip olması beklenir. Bununla birlikte, sıvı yağların aksine katı film yağlayıcılarda film bozulduğunda kendini yenileme (self-healing) mekanizması bulunmadığından, aşınma direnci sınırlayıcı bir faktör olabilmektedir.

Katı yağlayıcılar tribolojik sistemlerde farklı şekillerde kullanılabilir. Bunlar; yüzeylere doğrudan katı yağlayıcı film kaplama olarak uygulanması, katı yağlayıcı içeren kompozit kaplamaların kullanılması, katı yağlayıcıların karşıt malzeme içerisine dolgu maddesi olarak dağıtılması, kuru temas koşullarında doğrudan temas bölgesine beslenmesi ve sıvı yağlayıcılara katkı maddesi olarak ilave edilmesi şeklinde sınıflandırılabilir. Ayrıca kendinden yağlamalı malzemeler (örneğin grafit-metal esaslı alaşımlar ve mikro-gözenekli polimerik yağlayıcılar) yüksek sıcaklıklarda ve lineer hareket koşullarında uzun süreli ve kararlı performans sunmaları nedeniyle rulman uygulamalarında giderek artan bir öneme sahiptir. Tablo 1’de katı yağlayıcıların avantajları özetlenmiştir.

Tablo 1. Katı Yağlayıcıların Avantajları

Avantajlar	Açıklama
<i>Buharlaşmaz, gaz çıkışı ihmal edilebilir düzeydedir</i>	Katı yağlayıcılar sıvı yağlar gibi buhar basıncına sahip olmadığından vakum ortamlarında kontaminasyona neden olmaz. Bu özellik, uzay mekanizmaları, optik sistemler ve hassas sensör yatakları için kritik önemdedir.
<i>Akmez ve migrasyon göstermez</i>	Yağlayıcı film, temas yüzeyinde sabit kalır; santrifüj kuvvetiyle dağılma veya çevre bileşenlere yayılma söz konusu değildir. Bu durum, mikro-mekanik sistemlerde ve dar toleranslı yataklarda güvenilirlik sağlar.
<i>Dışarıdan sürekli yağlayıcı beslemesine ihtiyaç duymaz</i>	Film yüzeye önceden kaplandığından, çalışırken yağ veya gres takviyesi gerekmez. Bu özellik, kapalı sistemler ve bakımın mümkün olmadığı uygulamalar için büyük avantajdır.
<i>Çok küçük ve karmaşık sistemlerde uygulanabilir</i>	MEMS, mikro yataklar, ince boşluklu mekanizmalar gibi sıvı yağın hapsedilemediği sistemlerde etkin yağlama sağlar.
<i>Geniş sıcaklık aralığında çalışabilir</i>	Viskoziteye bağlı davranış göstermediğinden, çok düşük ve çok yüksek sıcaklıklarda kararlı performans sunar.
<i>Yüksek temas basınçlarında etkilidir</i>	Lamelli yapılar (ör. MoS ₂ , grafit) düşük kayma dayanımı sayesinde yüksek yük altında bile düşük sürtünme sağlar.
<i>Temiz bir yağlama çözümüdür</i>	Sızma, damlama veya çevresel kirlenme yaratmaz; temiz oda ve hassas üretim ortamlarında tercih edilir.
<i>Elektriksel iletkenlik sağlayabilir</i>	MoS ₂ ve grafit gibi katı yağlayıcılar statik yük birikimini önleyerek elektriksel kararlılık sunar.
<i>Uzun süreli depolamada bozulmaz</i>	Oksidasyon ve kimyasal yaşlanma sıvı yağlara kıyasla çok daha sınırlıdır.
<i>Hızlandırılmış ömür testleri yapılabilir</i>	Yağlama mekanizması bilindiğinde, aşınma ve ömür tahmini kontrollü biçimde gerçekleştirilebilir.

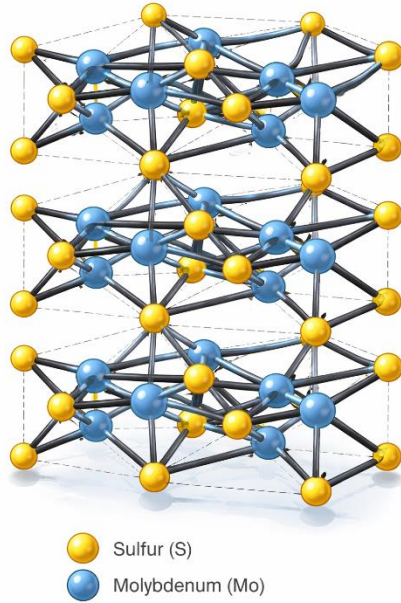
MoS₂ ve Özellikleri

Molibden disülfür (MoS₂), yapısal açıdan grafit benzer özellikler sergileyen, hekzagonal tabakalı bir kristal kafes yapısına sahip bir bileşiktir. MoS₂'nin üstün yağlama performansı, sahip olduğu kristal yapı ve elektronik düzen ile doğrudan ilişkilidir ve bu özellikler onu tribolojik uygulamalar açısından son derece değerli kılmaktadır. MoS₂ kristal yapısı, literatürde sıklıkla “sandviç yapı” olarak tanımlanan ve üçgen prizma geometrisine sahip bir düzenleme şeklinde ifade edilmektedir. Bu yapı içerisinde sülfür (S) atomları prizmanın köşelerinde konumlanırken, molibden (Mo) atomları prizmanın merkezinde yer almaktadır. Her bir Mo atomu, prizmanın köşelerini işgal eden altı adet S atomu ile koordine olmuş durumdadır. Molibden atomu, sülfür atomları ile bağlanma sırasında tamamen dolu bir d_{z^2} orbitaline sahiptir. Benzer şekilde, sülfür atomlarındaki sp^3 orbitalleri de dolu olduğundan, farklı sandviç tabakaları arasında etkin bir kovalent bağ oluşumu söz konusu değildir. Bu nedenle, komşu sandviç tabakaları arasında kimyasal bağ bulunmamakta, tabakalar yalnızca zayıf fiziksel etkileşimler ile bir arada tutulmaktadır (Bülbül & Efeoglu, 2010; Vazirisereshk et al., 2019).

Şekil 1’de şematik olarak gösterildiği üzere, farklı sandviç düzlemleri arasındaki bu zayıf etkileşim, tabakaların birbirleri üzerinde kolaylıkla kayabilmesine olanak tanımaktadır. Bu kayma kabiliyeti, MoS₂'nin düşük sürtünme katsayısı sergilemesinin temel nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Her bir Mo atomu, yaklaşık 0,241 nm uzaklıkta bulunan S atomlarının oluşturduğu üçgen prizmatik bir çevreleme ile sarılmıştır. Komşu sülfür düzlemleri arasındaki mesafe ise yaklaşık 0,308 nm’dir. Bu yapı içerisinde, her bir S–Mo–S tabaka grubundaki atomlar güçlü kovalent bağlarla birbirine bağlanmışken, komşu sülfür tabakaları arasındaki etkileşimler zayıf Van der Waals bağları ile sınırlıdır. Sonuç olarak, komşu sülfür düzlemleri birbirleri üzerinde düşük

dirençle kayabilmekte ve MoS₂'nin karakteristik düşük sürtünme davranışı bu zayıf tabakalar arası etkileşimlere atfedilmektedir (Balendhran et al., 2012; Bellido-González et al., 1997; Bhat, 1993; Dai et al., 2017; Helveg et al., 2000; Samy et al., 2021).

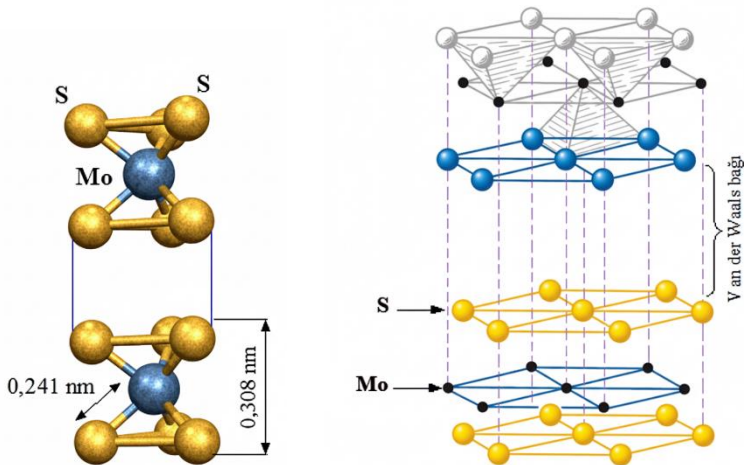
Şekil 1. MoS₂'nin temel sandviç yapısı ve farklı sandviçler arasındaki etkileşim



Şekil 2’de, sırasıyla MoS₂ yapısını oluşturan iki katman içerisindeki atomik düzen ve molibden disülfürün kristal yapısı şematik olarak gösterilmektedir. Molibden elementi, endüstriyel ölçekte ağırlıklı olarak molibdenit (MoS₂) minerali içeren cevherlerden elde edilmektedir. Zenginleştirme işleminin ardından, MoS₂ minerali bol oksijen içeren bir ortamda kavrularak molibden trioksit (MoO₃) formuna dönüştürülmektedir ($2 \text{ MoS}_2 + 7 \text{ O}_2 = 2 \text{ MoO}_3 + 4 \text{ SO}_2$). Bu dönüşüm sırasında sülfür bileşenleri kükürt dioksit (SO₂) gazı hâlinde ortamdan uzaklaştırılmaktadır. Elde edilen

MoO_3 , molibdenin hedeflenen son kullanım alanına bağı olarak farklı metalurjik işlemlerden geçirilmektedir. Özellikle çelik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve yaklaşık %50–75 oranında molibden içeren ferromolibden alaşımı, termit reaksiyonu veya elektrik ark fırınlarında ergitme yöntemleri ile üretilmektedir (Behmadi et al., 2023; Prasad et al., 1997; Tripathy & Rakhasia, 2006).

Şekil 2. (a) İki katman içerisindeki atomlar, (b) MoS_2 'nin kristal yapısı



Molibden disülfür (MoS_2), mavimsiye kurşun grisi renge sahip olup çizgi rengi gri-yeşilimsiye tonlardadır. Metalik parlaklık gösteren ve opak bir yapıya sahip olan MoS_2 , levha biçimli kristaller hâlinde bulunur. Bu levhalar bükülebilir olmakla birlikte elastik özellik sergilemez. Dokunulduğunda ele yağimsı bir his vermesi, karakteristik tribolojik özelliklerinin makroskobik bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Grafitte kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip olan MoS_2 , aynı zamanda daha belirgin bir metalik görünüm sergiler ve kâğıt üzerine sürüldüğünde iz bırakabilmektedir (Gregory Cetnarowski, 2008).

Termal davranış açısından değerlendirildiğinde, MoS_2 üfleç alevinde erimez; alevi yeşilimsi-sarı bir renge boyar. Kömür üzerinde ısıtıldığında ise beyazımsı bir ışık halkası oluşumu gözlenir. Kimyasal dayanımı yüksek olan MoS_2 , nitrik asit (HNO_3) içerisinde çözünmemekte; bunun yerine bozunarak molibden trioksit (MoO_3) artığı bırakmaktadır. Doğada genellikle kalay cevherleri ile birlikte bulunmakta olup, oluşumuna sıklıkla kuvars minerali de eşlik etmektedir. Molibdenit cevherinin başlıca üretim bölgeleri arasında Amerika Birleşik Devletleri (özellikle Kolorado ve New Jersey), Kanada, İngiltere, İsviçre ve Avustralya yer almaktadır (Kazuhisa Miyoshi, 2001; Kumar et al., 2022; Mittal et al., 2023; Sliney, 1982).

Kimyasal açıdan MoS_2 , çoğu kimyasal ortama karşı ilgisiz ve yüksek kararlılık gösteren, genellikle korozif olmayan ve zehirsiz bir mineral olarak kabul edilmektedir. MoS_2 'nin metallere karşı özel bir ilgi (afinite) sergilediği bilinmekle birlikte, bu etkileşimin temelinde yatan mekanik-termik-kimyasal bağlanma mekanizması atomik ölçekte henüz tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Buna rağmen, MoS_2 gerek endüstriyel uygulamalarda gerekse bilimsel araştırmalarda önemli bir ilgi odağı olmuş; fiziksel özellikleri ayrıntılı biçimde tanımlanmış ve mikroskobik ölçekte kuru yağlayıcı olarak sergilediği davranışlar deneysel olarak ortaya konulmuştur (Samy et al., 2021).

MoS_2 'nin tipik fiziksel ve tribolojik özellikleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Bu malzemenin en önemli yapısal özelliklerinden biri, son derece düşük kesme mukavemetine sahip olmasıdır (Ahmed et al., 2025; Bülbül & Efeoglu, 2010; Hua et al., 2025; Paradecka et al., 2017; Y. Zhang et al., 2021). Grafitin aksine, nemsiz veya vakum ortamlarında dahi etkin yağlama performansı gösterebilmektedir. Normal çalışma koşullarında MoS_2 , genellikle grafitle kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı sergilemektedir. Düşük yük taşıma kapasitesinin artırılması amacıyla, MoS_2 çoğu zaman grafit içerisine

düşük oranlarda ilave edilmektedir. Ayrıca, altın, gümüş, indiyum ve kurşun gibi yumuşak metallerle yapılan alaşımlara da sınırlı miktarlarda katılarak tribolojik performansın iyileştirilmesi sağlanmaktadır (Bhat, 1993; Erdem et al., 2018; Kazuhisa Miyoshi, 2001).

Tablo 2. MoS₂’nin tipik özellikleri

<i>% Mo (ağırlıkça)</i>	59.94
<i>% S (ağırlıkça)</i>	40.06
<i>Ergime sıcaklığı, °C</i>	1185
<i>Yoğunluk, g/cm³</i>	4.80-5.5
<i>Kristal yapısı</i>	Hegzagonal-Dihegzagonal dipiramidal
<i>Moleküler ağırlık, g/mol</i>	160.07
<i>İsminin kökeni</i>	Grekçe’de “molybdos=lead”
<i>Yarılma</i>	[0001] düzleminde mükemmel
<i>Renk</i>	Siyah, kurşun grisi, gri
<i>Sertlik</i>	1-1.5 Talk
<i>Parlaklık</i>	Metalik

MoS₂’nin Üretim Yöntemleri

a) Doğal Molibdenit Cevherinden Üretim

Molibden disülfür (MoS₂), doğada başlıca molibdenit minerali formunda bulunur ve endüstriyel üretimin ana kaynağını oluşturur. Üretim süreci; cevherin kırılması, öğütülmesi ve flotasyon yoluyla

zenginleştirilmesini kapsar. Bu yöntemle elde edilen MoS₂, özellikle katı yağlayıcı uygulamalarında (toz formu, gres katkısı ve bağlanmış kaplamalar) yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak doğal kaynaklı MoS₂'nin kristal boyutu, saflığı ve kusur yoğunluğu üzerinde sınırlı kontrol sağlanabilmektedir (Prasad et al., 1997; Vazirisereshk et al., 2019).

b) Kimyasal Buhar Kaplama (CVD – Chemical Vapor Deposition)

Kimyasal buhar kaplama yöntemi, yüksek kristal kalitesine sahip MoS₂ ince filmlerinin sentezlenmesinde en yaygın kullanılan sentetik yöntemlerden biridir. Bu yöntemde MoO₃ gibi molibden içeren öncüller ile kükürt buharı, soy gaz atmosfer altında 650–900°C sıcaklıklarda reaksiyona sokularak MoS₂ tabakaları taban malzeme yüzeyinde büyütülür. CVD yöntemi, tek katmanlı veya birkaç katmanlı MoS₂ üretimine olanak tanınması nedeniyle elektronik ve optoelektronik uygulamalar için büyük önem taşımaktadır (Guan et al., 2021; H. Liu et al., 2017; Tummala et al., 2020; L. Wang et al., 2017; W. Wang et al., 2017; Z. Zhu et al., 2021).

c) Hidrotermal ve Solvotermal Sentez

Hidrotermal ve solvotermal sentez yöntemleri, nanoyapılı MoS₂ üretiminde yaygın olarak kullanılan geleneksel ıslak kimyasal yaklaşımlardır. Bu yöntemlerde molibden ve kükürt içeren öncüller, kapalı otoklav sistemlerinde yüksek buhar basıncı ve görece ılımlı sıcaklıklarda reaksiyona sokularak yüksek verim, homojen tabaka kalınlığı ve kontrol edilebilir parçacık boyutu elde edilir (Gupta et al., 2015; Tan et al., 2017). Hidrotermal sentez sulu çözücüler kullanırken, solvotermal sentez etanol, DMF, etilen ve glikol gibi organik çözücülere dayanır. Her iki yöntem de MoS₂'nin nanolevha, nanoküre ve çiçeksi/yaprak benzeri yapılar gibi farklı morfolojilerde üretilmesine olanak tanır. İyonik sıvılar ve yüzey aktif maddeler, morfoloji kontrolünü daha da geliştiren yardımcı ajanlar olarak kullanılmaktadır (Du et al., 2015; Ma et al., 2008; Pirarath et al.,

2021). Buna karşın, uzun reaksiyon süreleri ve sınırlı ölçeklenebilirlik bu yöntemlerin başlıca dezavantajları olup, büyük ölçekli endüstriyel uygulamaları kısıtlamaktadır. (Cao et al., 2020; G. Feng et al., 2015; X. Feng et al., 2013; H. Huang et al., 2022; Prabhakar Vattikuti et al., 2015; J. Sun et al., 2017).

d) Mekanik Soyma (eksfoliasyon)

Mekanik soyma yöntemi - literatürde mikromekanik yarma (micromechanical cleavage) veya yaygın adıyla Scotch-tape yöntemi olarak da bilinmektedir - tabakalı kristal yapıya sahip malzemelerin, zayıf van der Waals bağları boyunca mekanik kuvvetler yardımıyla atomik incelikte tabakalara ayrılmasına dayanır. Bu yaklaşım, iki boyutlu malzemelerin üretiminde ilk kez grafen için başarıyla uygulanmış olup, sonrasında MoS₂ gibi geçiş metali dikalkojenitlerine (TMD'ler) uyarlanmıştır (Late et al., 2012; Novoselov et al., 2004, 2005). Bu yöntemde, hacimsel MoS₂ kristali genellikle yapışkan bir bant aracılığıyla tekrar tekrar soyularak inceltilir veya kristalin katı bir yüzeyle sürtünmesi yoluyla tabakalar ayrılır (Li et al., 2014; Novoselov, 2011). Taban malzeme yüzeyinin bant uygulanmadan önce temizlenmesi, elde edilen nanolevha (nanosheet)'lerin kalitesini ve tutunma verimini önemli ölçüde artırmaktadır (K.-J. Huang et al., 2015). Ayrıca, taban malzeme olarak ince bir altın (Au) filmi kullanılması, altının kükürt ile yüksek kimyasal toleransa sahip olması nedeniyle MoS₂ tabakaları arasındaki van der Waals etkileşimlerini zayıflatmakta ve soyma verimini artırmaktadır (Desai et al., 2016; Magda et al., 2015).

Mekanik soyma ya da ayırma yöntemi, pahalı veya karmaşık ekipmanlara ihtiyaç duymaması ve en temiz, en kristalin ve atomik olarak en ince MoS₂ tabakalarının elde edilmesine olanak sağlaması açısından oldukça avantajlıdır (Kolobov & Tominaga, 2016). Bu yöntemle üretilen MoS₂ nanolevhalar, son derece düşük kusur yoğunluğu ve yüksek kristal düzeni sergilemektedir. Ancak üretim miktarının son derece sınırlı olması ve süreç üzerinde ölçeklenebilir

bir kontrol sağlanamaması nedeniyle, mekanik soyma yalnızca temel bilimsel araştırmalar ve laboratuvar ölçekli çalışmalar için uygundur; endüstriyel üretim açısından pratik bir yöntem değildir (R. T. Busch et al., 2023; Cheung et al., 2024; DiCamillo et al., 2019; J. Huang et al., 2022; Kobayashi et al., 2023; Saliba et al., 2023; Y. Zhang et al., 2023).

Mekanik soymanın bir uzantısı olarak geliştirilen nanomekanik soyma yöntemi ise, belirli katman sayısına sahip yüksek kaliteli MoS₂ nanolevhaların kontrollü biçimde üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yöntemde, uç çapı yaklaşık 10 nm olan son derece keskin bir tungsten prob kullanılarak, taban malzeme üzerinde kenardan hizalanmış kalın MoS₂ pullarından tabakalar soyulmaktadır. Prob hareketi piezoelektrik aktüatörler aracılığıyla sağlanmakta ve tüm süreç yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu (HRTEM) altında gerçek zamanlı olarak izlenmektedir (Tang et al., 2014). Benzer şekilde, Miyake ve Wang, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanarak yarıçapı 50 nm'nin altında olan Si uçlar ile nanometre ölçekli mekanik işleme ve soyma gerçekleştirmiştir (Miyake & Wang, 2015). Her ne kadar nanomekanik soyma, katman sayısı ve yapı üzerinde daha hassas bir kontrol sunsa da karmaşık donanım gereksinimi ve düşük üretim kapasitesi nedeniyle bu yaklaşım da araştırma amaçlı uygulamalarla sınırlı kalmaktadır (Abdel Maksoud et al., 2021).

e) Kimyasal/Elektrokimyasal Soyma

Elektrokimyasal soyma yöntemi, yumuşak işlem koşulları, basitliği, tekrarlanabilirliği ve büyük ölçekli üretime uygunluğu nedeniyle MoS₂ nanolevhaların üretiminde umut verici bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Ji et al., 2019). Bu yöntemin yaygın bir uygulaması, lityum iyonlarının MoS₂ tabakaları arasına girmesi yoluyla tabakalar arası van der Waals etkileşimlerinin zayıflatılmasına ve soyulmanın kolaylaştırılmasına dayanmaktadır. Lityum yerleşimine dayalı bu elektrokimyasal yaklaşım, kimyasal

soyma yöntemiyle kavramsal olarak benzerlik göstermektedir. Her iki yöntemde de lityumun tabakalar arasına yerleşmesiyle bağlanma zayıflamakta ve sıvı ortamda (genellikle su veya alkol) ultrasonik destekle ince MoS₂ levhaları elde edilebilmektedir (Abdel Maksoud et al., 2021; Ji et al., 2019; Zeng et al., 2011). Ancak, her iki yöntemin ortak dezavantajı, kalıntı lityumun neden olduğu yapısal ve elektronik bozulmalardır. Bu durum, yarı iletken 2H fazından metalik 1T fazına kısmi bir faz dönüşümüne, kafes bozulmasına ve kristalin düzenin azalmasına yol açarak MoS₂'nin özgün yarı iletken özelliklerini olumsuz etkilemektedir (Eda et al., 2011; El Garah et al., 2018; Martínez-Jódar et al., 2024; Py & Haering, 1983; X. Zhu et al., 2022). Bu sınırlamaları aşmak amacıyla geliştirilen anodik elektrokimyasal soyma yönteminde, Liu vd. tarafından MoS₂ anot, platin tel karşı elektrot ve 0,5 M Na₂SO₄ sulu çözeltisi elektrolit olarak kullanılmış; bu sayede 50 µm'ye kadar yanal boyutlara ve yüksek kristalin yapıya sahip tek ve birkaç tabakalı MoS₂ tabakalar başarıyla üretilmiştir (N. Liu et al., 2014).

f) Fiziksel Buhar Kaplama (PVD / Sputtering)

Fiziksel buhar kaplama ve özellikle sıçratma (sputtering) yöntemi, MoS₂'nin tribolojik kaplama olarak uygulanmasında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Vakum ortamında MoS₂ hedef malzemesinden koparılan atomlar, taban malzeme yüzeyinde ince film oluşturur. Bu yöntem, homojen kaplamalar ve düşük sürtünme katsayıları sağlarken, elde edilen filmlerin kristal düzeni genellikle CVD ile üretilen filmlere kıyasla daha düşüktür (Bülbül & Efeoglu, 2016; Han et al., 2021; Scheler et al., 2025; Tian et al., 2022).

MoS₂ Kaplamalarda Mikroyapı, Yönlenme ve Tribolojik Davranış

Tribolojik olarak verimli MoS₂ kaplamalar, yağlar ve gresler gibi konvansiyonel akışkan yağlayıcıların kullanılamadığı aşırı çalışma koşullarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu koşullar;

vakum ortamları (örneğin uzay uygulamaları), yüksek sıcaklıklar (sertleştirme fırınları), çok düşük sıcaklıklar (kriyojenik sistemler), yüksek enerjili radyasyon alanları (nükleer füzyon reaktörleri) ve yağlayıcı kontaminasyonunun kabul edilemez olduğu hassas mekanik sistemler (optik cihaz yatakları) gibi uygulamaları kapsamaktadır (X. Sun, 2013; Vazirisereshk et al., 2019). Özellikle manyetik alan destekli sıçratma (magnetron sputtering) yöntemiyle üretilen MoS₂ kaplamalar, vakum koşullarında sergiledikleri üstün tribolojik performans nedeniyle en etkili katı yağlayıcı sistemlerden biri olarak kabul edilmektedir (Chen et al., 2018; Scharf & Prasad, 2013).

MoS₂ kaplamaların çok düşük sürtünme katsayısı (COF) (Martin et al., 1993, 1994) ve düşük aşınma oranı (Donnet et al., 1996), temel olarak tabakalı (lamelli) kristal yapılarından kaynaklanmaktadır (Hilton & Fleischauer, 1990). MoS₂ kristal yapısı, birbirine zayıf van der Waals bağlarıyla tutunan S–Mo–S sandviç lamellerinden oluşur. Bu lameller, kaplama içerisinde taban malzemeye paralel (bazal), dik veya rastgele yönlenmiş şekilde bulunabilir. Literatürde, bazal düzlem yönlenmesi, lameller arası kolay kaymaya (“easy shear”) olanak tanıdığı ve daha uzun kaplama ömrü ile ilişkilendirildiği için en arzu edilen yönlenme olarak kabul edilmektedir (Fleischauer, 1984; Kokalj et al., 2020; Spalvins, 1992).

Sıçratma ile büyütülen MoS₂ kaplamalar sıklıkla, taban malzemeye dik doğrultuda gelişen kolonlu fiberimsi bir mikroyapı sergiler. Bu yapı, yaklaşık 0,25 µm çapında düşey kolonlardan oluşmakta olup, kolonlar birbirlerinden onlarca nanometre genişliğinde açık boşluk sınırları ile ayrılmaktadır. Bu düşük yoğunluklu bölgeler, yüksek artık gerilmeler ve yüksek dislokasyon yoğunluğu içermektedir.

Kaplamanın kristal yapısı tribolojik davranış üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Amorf MoS₂ kaplamalar (≈1 nm tane

boyutu), yüksek yoğunluklu, sert ve gevrek bir yapı sergilemekte; genellikle abrazif aşınma davranışı göstermekte ve sürtünme katsayısı yaklaşık 0,4 mertebesine kadar çıkabilmektedir. Buna karşılık, uygun stokiometrik bileşime sahip çok kristalli MoS₂ kaplamalar (5–10 nm tane boyutu), yaklaşık 0,05 gibi çok düşük sürtünme katsayısı ve uzun aşınma ömrü ile etkili bir katı yağlama davranışı sunmaktadır.

Kristalografik yönlenme yalnızca mekanik değil, aynı zamanda kimyasal kararlılık açısından da kritik öneme sahiptir. Özellikle yüksek nemli ortamlarda, rastgele yönlenmiş MoS₂ kaplamaların çevresel etkilere daha duyarlı olduğu ve MoS₂'nin oksitlenerek MoO₃'e dönüşmesi sonucu tribolojik özelliklerin hızla bozulduğu rapor edilmiştir. Buna karşın, yardımcı düzlemsel (bazal) yönlenmeye sahip kaplamalar, daha kararlı sürtünme davranışı ve daha iyi çevresel dayanım sergilemektedir.

Zamanla, farklı yönlenmeye sahip tabakalar arasındaki ara yüzeyde yeniden gelişen düzlemsel yapı, kaplama bütünlüğünün bozulmasına neden olabilmektedir. Bhushan ve Gupta (Bhat, 1993), taban malzemeye dik yönlenmiş tabakalara sahip MoS₂ kaplamalarda 100.000 devirlik kayma sonrası tabakaların yaklaşık %40'ının hâlen yönlenmemiş olduğunu bildirmiştir. Bu durum, MoS₂'nin kenar düzlemleri ((100) gibi) ile taban malzeme atomları arasındaki kimyasal bağ geriliminden kaynaklanan, ara yüzeyde yönlenemeyen bir tabaka bölgesinin varlığına işaret etmektedir.

Sıçratma prosesinde sıcaklık, basınç, taban malzeme bias gerilimi ve hedef–taban malzeme mesafesi, MoS₂ kaplamaların mikroyapısını doğrudan etkilemektedir (Dimigen et al., 1985; Messier et al., 1984; Thornton, 1974; Vierendeel et al., 2012, 2015; Weise et al., 1995, 1997; X. Zhang et al., 2001). Özellikle hedef–taban malzeme mesafesinin artmasıyla iyonların altlığa çarpma enerjisinin azalması, film büyümesini olumsuz etkileyerek daha gevşek ve gözenekli yapılara yol açabilmektedir.

MoS₂ kaplamaların tribolojik performansı, S/Mo atomik oranı gibi stokiyometrik parametrelerle yakından ilişkilidir (Bülbül et al., 2007). Non-stokiyometrik MoS_x kaplamalarda bulunan doymamış bağlar, çevresel gazların adsorpsiyonuna olanak tanıyarak sürtünme katsayısının oksijen kısmi basıncına bağlı olarak değişmesine neden olmaktadır. Buna karşın, stokiyometrik MoS₂ kaplamalarda sürtünme katsayısı çevresel oksijen basıncından büyük ölçüde bağımsızdır.

Kaplama kalınlığı da kritik bir parametredir. Yaklaşık 0,2 µm kalınlığında MoS₂ filmlerin etkin yağlama sağladığı; toplam kaplama kalınlığının ise genellikle 0,2–0,6 µm aralığında ve 1 µm'nin altında tutulması gerektiği bildirilmektedir. Kolonlu yapıdan kopan parçacıklar, aşınma artıkları (debris) oluşturarak tribolojik performansı olumsuz etkileyebilmektedir.

Oksijen ve/veya nem varlığında MoS₂ kaplamaların performansı belirgin biçimde azalmaktadır. Bu koşullarda MoS₂'nin SO₂, H₂S ve H₂SO₄ gibi oksidasyon ürünlerine dönüştüğü rapor edilmiştir. Nemli ortamlarda performans kaybı; PTFE gibi suya dirençli katkılar, metal katkılı MoS₂ kompozit kaplamalar veya korozyona dirençli ara tabakalar kullanılarak önemli ölçüde azaltılabilmektedir. PTFE ilavesinin, sürtünme katsayısını 0,2–0,32 aralığından ≈0,1 seviyesine düşürdüğü ve kaplama ömrünü yaklaşık on kat artırdığı bildirilmiştir.

Endüstriyel uygulamalarda, karmaşık geometrilere sahip parçaların homojen kaplanabilmesi için üç eksenli (3-fold) taban malzeme rotasyonu zorunludur. Ancak literatürdeki birçok çalışma bu koşulları içermediğinden, laboratuvar ölçekli sonuçların endüstriyel uygulamalara aktarılabilirliği hâlen önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır (Vierneusel et al., 2013).

Metal İlavesinin Sürtünme ve Aşınmaya Etkisi

Mekanik dayanımı ve oksidasyona karşı direnci birlikte iyileştirmeye yönelik diğer çalışmalar, MoS₂ içerisine Ti, Ni ve Ta gibi geçiş metallerinin katkılanmasına odaklanmıştır. İlgili araştırmalarda, bu katkı atomları sayesinde MoS₂ kaplamaların hem mekanik mukavemetinin artırılabilirdiği hem de oksidatif bozunmanın engellenebildiği ileri sürülmüştür (Simmonds et al., 1999; Stupp, 1981). Şöyle ki MoS₂ ile birlikte az miktarda titanyumun eş-zamanlı sıçratma yoluyla kaplamaya dâhil edilmesiyle, kaplama özelliklerinin daha da geliştirilebileceği belirtilmiştir (Bellido-González et al., 1997; Efeoglu & Bulbul, 2005; Fox et al., 1999; Renevier et al., 2000; Siu & Li, 2000; Teer, 2001; D. Y. Wang et al., 1999). Bu tür kaplamalarda MoS₂ katı yağlama işlevini sağlarken, Ti katkısının yük taşıma kapasitesini artırdığı ve filmin taban malzemeye adezyonunu iyileştirdiği görülmüştür.

Stupp (Stupp, 1981) ve Spalvins (Spalvins, 1984), kolonlu bölgede kaplama yoğunluğunu ve mekanik dayanımı artırmak amacıyla MoS₂ kaplamalara metal katkılar ilave etmişlerdir. Stupp (1981) (Stupp, 1981), Ni, Ta ve Mo hedeflerini kullanarak eş-zamanlı sıçratma yöntemiyle Ni–MoS₂ ve Ta–MoS₂ kaplamalar üretmiştir. Saf MoS₂ kaplamalarla karşılaştırıldığında, metal katkılı MoS₂ kaplamaların yaklaşık %35 daha düşük sürtünme katsayısı, daha yüksek işlevsel kararlılık ve birim kalınlık başına ortalama iki kat daha fazla aşınma ömrü sağladığı belirlenmiştir. Spalvins (Spalvins, 1984) ise sıkı bir Au–MoS₂ sıçratma hedefi kullanarak Au–MoS₂ kaplamalar üretmiş ve bu kaplamaların saf MoS₂ kaplamalara kıyasla daha düşük ve daha kararlı sürtünme katsayısı ile daha az aşınma artışı oluşturduğunu rapor etmiştir. Kayma sırasında her iki kaplama türünde de kolonlu bölgede kırılma meydana gelmekle birlikte, Au–MoS₂ kaplamalarda kolon yoğunluğunun daha yüksek olması nedeniyle ayrılan tabakaların

büyük ölçüde bütünlüğünü koruduğu ve daha az parçalanma gösterdiği belirtilmiştir. Sonuç olarak, saf MoS₂ kaplamalara kıyasla daha az aşınma artışı olduğu gözlemlenmiştir (Bhat, 1993).

Sonuçlar

Bu çalışmada, katı yağlayıcılar ve özellikle molibden disülfür (MoS₂), tarihsel gelişiminden başlayarak güncel ileri teknoloji uygulamalarına kadar uzanan geniş bir çerçevede incelenmiştir. Katı yağlayıcıların, sıvı yağlayıcıların yetersiz kaldığı vakum, yüksek sıcaklık, aşırı radyasyon ve bakımın mümkün olmadığı kapalı sistemler gibi zorlu çalışma koşullarında vazgeçilmez çözümler sunduğu ortaya konulmuştur. Bu bağlamda MoS₂, tabakalı kristal yapısı sayesinde düşük kesme mukavemeti, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek yük taşıma kapasitesi sunarak diğer katı yağlayıcılara kıyasla öne çıkmaktadır.

MoS₂'nin tribolojik performansının temelinde, S–Mo–S sandviç tabakaları arasındaki zayıf van der Waals etkileşimleri yatmakta olup, bu yapı tabakalar arası kolay kaymaya olanak tanımaktadır. Grafitten farklı olarak MoS₂'nin nemsiz ve vakum ortamlarında da etkin yağlama sağlayabilmesi, onu özellikle uzay ve yüksek teknoloji uygulamaları için kritik bir malzeme hâline getirmektedir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda oksidasyona duyarlılık ve çevresel koşullara bağlı performans kaybı, MoS₂'nin kullanımını sınırlayan temel faktörler arasında yer almaktadır.

Çalışmada ele alınan üretim yöntemleri incelendiğinde, doğal molibdenit cevherlerinden elde edilen MoS₂'nin endüstriyel ölçekte yaygın kullanım sunduğu; buna karşılık CVD, hidro/solvotermal sentez, mekanik ve kimyasal/elektrokimyasal soyma gibi yöntemlerin daha yüksek kristal kalite, katman kontrolü ve fonksiyonel özelleştirme sağladığı görülmüştür. Ancak bu ileri yöntemlerin çoğunun ölçeklenebilirlik, maliyet ve süreç karmaşıklığı açısından sınırlamalara sahip olduğu belirlenmiştir.

Özellikle lityum ara katmanlama temelli soyma yöntemlerinde ortaya çıkan faz dönüşümleri ve kristal bozulmalar, elektronik uygulamalar açısından önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır.

MoS₂ kaplamalarda mikroyapı ve kristalografik yönlenmenin tribolojik davranış üzerinde belirleyici olduğu; bazal düzlem yönlenmesine sahip, stokiyometrik ve yüksek yoğunluklu kaplamaların en düşük sürtünme katsayısı ve en uzun aşınma ömrünü sağladığı ortaya konulmuştur. Ayrıca metal katkılı MoS₂ kaplamaların, kolonlu yapının mekanik dayanımını artırarak aşınma direncini ve kararlılığı önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür.

Sonuç olarak, MoS₂ tabanlı katı yağlayıcıların performansının; üretim yöntemi, mikroyapı, yönlenme, çevresel koşullar ve katkı sistemleriyle doğrudan ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Gelecekteki çalışmaların, endüstriyel ölçekte üretilebilirliği yüksek, çevresel kararlılığı artırılmış ve uzun ömürlü MoS₂ kompozit kaplamaların geliştirilmesine odaklanması, katı yağlayıcı teknolojilerinin daha geniş uygulama alanlarına yayılmasını mümkün kılacaktır.

Kaynakça

- Abdel Maksoud, M. I. A., Bedir, A. G., Bekhit, M., Abouelela, M. M., Fahim, R. A., Awed, A. S., Attia, S. Y., Kassem, S. M., Elkodous, M. A., El-Sayyad, G. S., Mohamed, S. G., Osman, A. I., Al-Muhtaseb, A. H., & Rooney, D. W. (2021). MoS₂-based nanocomposites: synthesis, structure, and applications in water remediation and energy storage: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(5), 3645–3681. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01268-x>
- Abdelbary, A., & Chang, L. (2023a). Introduction to engineering tribology. In *Principles of Engineering Tribology*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-99115-5.00013-x>
- Abdelbary, A., & Chang, L. (2023b). Lubricants and their properties. In *Principles of Engineering Tribology* (pp. 345–389). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99115-5.00003-7>
- Advanced Fluoropolymer Nanocomposites*. (2023). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2021-0-02570-0>

- Ahmed, N., Alam, M. A., Sayem, S. M., Hassan, M., & Ghosh, S. (2025). Enhancing tribological properties of MoS₂ coatings through doping: a review of mechanisms and applications. *Discover Mechanical Engineering*, 4(1), 20. <https://doi.org/10.1007/s44245-025-00105-7>
- Balendhran, S., Ou, J. Z., Bhaskaran, M., Sriram, S., Ippolito, S., Vasic, Z., Kats, E., Bhargava, S., Zhuiykov, S., & Kalantar-zadeh, K. (2012). Atomically thin layers of MoS₂ via a two step thermal evaporation-exfoliation method. *Nanoscale*, 4(2), 461–466. <https://doi.org/10.1039/C1NR10803D>
- Behmadi, R., Mirzaei, M., Afshar, M. R., & Najafi, H. (2023). Investigation of chalcopyrite removal from low-grade molybdenite using response surface methodology and its effect on molybdenum trioxide morphology by roasting. *RSC Advances*, 13(22), 14899–14913. <https://doi.org/10.1039/D3RA02384B>
- Bellido-González, V., Jones, A. H. S., Hampshire, J., Allen, T. J., Witts, J., Teer, D. G., Ma, K. J., & Upton, D. (1997). Tribological behaviour of high performance MoS₂ coatings produced by magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 97(1–3). [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00546-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00546-X)
- Bhat, D. G. (1993). A review of: “ HANDBOOK OF TRIBOLOGY Materials, Coatings, and Surface Treatments ” by B. Bhushan and B.K. Gupta McGraw-Hill Publishing Company 1221 Avenue of the Americas New York, NY 10020, USA 1168 pages, Hardbound, 1991 . *Materials and Manufacturing Processes*, 8(1). <https://doi.org/10.1080/10426919308934817>
- Bülbül, F., & Efeoğlu, İ. (2016). Synergistic effect of bias and target currents for magnetron sputtered MoS₂-Ti composite films. *Materialpruefung/Materials Testing*, 58(5). <https://doi.org/10.3139/120.110870>
- Bülbül, F., & Efeoğlu, I. (2010). MoS₂-Ti composite films having (002) orientation and low Ti content. *Crystallography Reports*, 55(7). <https://doi.org/10.1134/S1063774510070126>
- Bülbül, F., Efeoğlu, I., & Arslan, E. (2007). The effect of bias voltage and working pressure on S/Mo ratio at MoS₂-Ti composite films. *Applied Surface Science*, 253(9). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.09.059>

- Busch, C. (2006). Solid Lubrication. In *Lubricants and Lubrication* (pp. 694–714). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527610341.ch17>
- Busch, R. T., Sun, L., Austin, D., Jiang, J., Miesle, P., Susner, M. A., Conner, B. S., Jawaid, A., Becks, S. T., Mahalingam, K., Velez, M. A., Torsi, R., Robinson, J. A., Rao, R., Glavin, N. R., Vaia, R. A., Pachter, R., Joshua Kennedy, W., Vernon, J. P., & Stevenson, P. R. (2023). Exfoliation procedure-dependent optical properties of solution deposited MoS₂ films. *Npj 2D Materials and Applications*, 7(1), 12. <https://doi.org/10.1038/s41699-023-00376-2>
- Campbell, M. E. (1971). A review of solid lubrication technology. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/710732>
- Cao, H., Bai, Z., Li, Y., Xiao, Z., Zhang, X., & Li, G. (2020). Solvothermal Synthesis of Defect-Rich Mixed 1T-2H MoS₂Nanoflowers for Enhanced Hydrodesulfurization. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(19). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00736>
- Chen, Z., He, X., Xiao, C., & Kim, S. H. (2018). Effect of Humidity on Friction and Wear—A Critical Review. *Lubricants*, 6(3), 74. <https://doi.org/10.3390/lubricants6030074>
- Cheung, W.-S., You, M.-H., Syu, S.-Y., Chou, Y.-H., & Chen, C.-Y. (2024). Advancing semantic segmentation of two-dimensional materials using a semantic-adaptive transformer model. *Applied Physics Letters*, 125(13). <https://doi.org/10.1063/5.0225989>
- Dai, Z., Jin, W., Grady, M., Sadowski, J. T., Dadap, J. I., Osgood, R. M., & Pohl, K. (2017). Surface structure of bulk 2H-MoS₂(0001) and exfoliated suspended monolayer MoS₂: A selected area low energy electron diffraction study. *Surface Science*, 660, 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2017.02.005>
- Desai, S. B., Madhvapathy, S. R., Amani, M., Kiriya, D., Hettick, M., Tosun, M., Zhou, Y., Dubey, M., Ager, J. W., Chrzan, D., & Javey, A. (2016). Gold-Mediated Exfoliation of Ultralarge Optoelectronically-Perfect Monolayers. *Advanced Materials*, 28(21), 4053–4058. <https://doi.org/10.1002/adma.201506171>
- Dhanumalayan, E., & Joshi, G. M. (2018). Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review. *Advanced*

- Composites and Hybrid Materials*, 1(2), 247–268.
<https://doi.org/10.1007/s42114-018-0023-8>
- DiCamillo, K., Krylyuk, S., Shi, W., Davydov, A., & Paranjape, M. (2019). Automated Mechanical Exfoliation of MoS₂ and MoTe₂ Layers for Two-Dimensional Materials Applications. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 18, 144–148.
<https://doi.org/10.1109/TNANO.2018.2868672>
- Dimigen, H., Hübsch, H., Willich, P., & Reichelt, K. (1985). Stoichiometry and friction properties of sputtered MoS_x layers. *Thin Solid Films*, 129(1–2).
[https://doi.org/10.1016/0040-6090\(85\)90097-5](https://doi.org/10.1016/0040-6090(85)90097-5)
- Donnet, C., Martin, J. M., Le Mogne, T., & Belin, M. (1996). Super-low friction of MoS₂ coatings in various environments. *Tribology International*, 29(2).
[https://doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)00094-K](https://doi.org/10.1016/0301-679X(95)00094-K)
- Dowson, D. (1979). *History of tribology*. <https://doi.org/10.2474/trol.6.ii>
- Du, H., Liu, D., Li, M., Al Otaibi, R. L., Lv, R., & Zhang, Y. (2015). Solvothermal synthesis of MoS₂ nanospheres in DMF–water mixed solvents and their catalytic activity in hydrocracking of diphenylmethane. *RSC Advances*, 5(97), 79724–79728. <https://doi.org/10.1039/C5RA08424E>
- Eda, G., Yamaguchi, H., Voiry, D., Fujita, T., Chen, M., & Chhowalla, M. (2011). Photoluminescence from chemically exfoliated MoS₂. *Nano Letters*, 11(12), 5111–5116. <https://doi.org/10.1021/nl201874w>
- Efeoglu, I., & Bulbul, F. (2005). Effect of crystallographic orientation on the friction and wear properties of MoS₂-Ti coatings by pulsed-dc in nitrogen and humid air. *Wear*, 258(5–6). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.073>
- El Garah, M., Bertolazzi, S., Ippolito, S., Eredia, M., Janica, I., Melinte, G., Ersen, O., Marletta, G., Ciesielski, A., & Samori, P. (2018). MoS₂ nanosheets via electrochemical lithium-ion intercalation under ambient conditions. *FlatChem*, 9, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2018.06.001>
- Erdem, O., İmece, Y., & Tuç, B. (2018). MoS₂ ve Grafit kaplamaların farklı ortam şartlarında tribolojik özelliklerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2018(2018).
<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416401>

- Erdemir, A. (2001). Handbook of Modern Tribology. *Handbook of Modern Tribology*.
- Feng, G., Wei, A., Zhao, Y., & Liu, J. (2015). Synthesis of flower-like MoS₂ nanosheets microspheres by hydrothermal method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(10), 8160–8166. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3476-3>
- Feng, X., Tang, Q., Zhou, J., Fang, J., Ding, P., Sun, L., & Shi, L. (2013). Novel mixed-solvothermal synthesis of MoS₂ nanosheets with controllable morphologies. *Crystal Research and Technology*, 48(6), 363–368. <https://doi.org/10.1002/crat.201300003>
- Fleischauer, P. D. (1984). Effects of crystallite orientation on environmental stability and lubrication properties of sputtered MoS₂. *ASLE Transactions*, 27(1). <https://doi.org/10.1080/05698198408981548>
- Fox, V., Hampshire, J., & Teer, D. (1999). MoS₂/metal composite coatings deposited by closed-field unbalanced magnetron sputtering: Tribological properties and industrial uses. *Surface and Coatings Technology*, 112(1–3). [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00798-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00798-1)
- Gregory Cetnarowski. (2008). *Structure and properties of molybdenum disulfide : based inclusion materials*. Simon Fraser University.
- Grützmacher, P. G., Voevodin, A. A., Korényi-Both, A., Righi, M. C., DellaCorte, C., Bageivan, N., Erdemir, A., & Gachot, C. (2025). The Promise of Solid Lubricants for a Sustainable Future. *Advanced Materials*. <https://doi.org/10.1002/adma.202500867>
- Guan, R., Duan, J., Yuan, A., Wang, Z., Yang, S., Han, L., Zhang, B., Li, D., & Luo, B. (2021). Chemical vapor deposition of clean and pure MoS₂ crystals by the inhibition of MoO₃-x intermediates. *CrystEngComm*, 23(1), 146–152. <https://doi.org/10.1039/D0CE01354D>
- Gupta, A., Sakthivel, T., & Seal, S. (2015). Recent development in 2D materials beyond graphene. *Progress in Materials Science*, 73, 44–126. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.02.002>
- Han, C., Li, G., Ma, G., Shi, J., Liu, Y., Li, Z., & Wang, H. (2021). Preparation and tribological properties of Mo/MoS₂-Pb-PbS composite films. *Surface and Coatings Technology*, 405, 126625. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126625>

- Hedayati, H., Mofidi, A., Al-Fadhli, A., & Aramesh, M. (2024). Solid Lubricants Used in Extreme Conditions Experienced in Machining: A Comprehensive Review of Recent Developments and Applications. *Lubricants*, 12(3), 69. <https://doi.org/10.3390/lubricants12030069>
- Helveg, S., Lauritsen, J. V., Lægsgaard, E., Stensgaard, I., Nørskov, J. K., Clausen, B. S., Topsøe, H., & Besenbacher, F. (2000). Atomic-scale structure of single-layer MoS₂ nanoclusters. *Physical Review Letters*, 84(5), 951–954. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.951>
- Hilton, M. R., & Fleischauer, P. D. (1990). TEM lattice imaging of the nanostructure of early-growth sputter-deposited MoS₂ solid lubricant films. *Journal of Materials Research*, 5(2). <https://doi.org/10.1557/JMR.1990.0406>
- Holmberg, K., Ronkainen, H., & Matthews, A. (2000). Tribology of thin coatings. *Ceramics International*, 26(7), 787–795. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00015-8)
- Hua, L., Su, F., Zhou, J., Sun, J., & He, J. (2025). Tribological properties of a-C/MoS₂:a-C multilayer composite films under vacuum and high-temperature environments. *Wear*, 582–583, 206363. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206363>
- Huang, H., Liu, N., Wang, X., Zhong, M., & Huang, X. (2022). Application of Hydrothermal and Solvothermal Method in Synthesis of MoS₂. *Revista de Chimie*, 73(4). <https://doi.org/10.37358/rc.22.4.8544>
- Huang, J., Liu, Y., Yan, P., Gao, J., Fan, Y., & Jiang, W. (2022). Mechanically exfoliated MoS₂ nanoflakes for optimizing the thermoelectric performance of SrTiO₃-based ceramic composites. *Journal of Materiomics*, 8(4), 790–798. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2022.02.002>
- Huang, K.-J., Wang, L., Zhang, J.-Z., & Xing, K. (2015). Synthesis of molybdenum disulfide/carbon aerogel composites for supercapacitors electrode material application. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 752, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.06.005>
- Ji, H., Hu, S., Jiang, Z., Shi, S., Hou, W., & Yang, G. (2019). Directly scalable preparation of sandwiched MoS₂/graphene nanocomposites via ball-milling with excellent electrochemical energy storage performance. *Electrochimica Acta*, 299, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.12.188>

- Kazuhisa Miyoshi. (2001). *Solid Lubrication Fundamentals and Applications* (K. Miyoshi, Ed.; Vol. 20014823). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420027068>
- Kobayashi, T., Sato, C., Dohi, T., & Kiriya, D. (2023). Propose an automated exfoliation process of MoS₂ with a universal mechanical setup. *Applied Physics Express*, 16(10), 106502. <https://doi.org/10.35848/1882-0786/acfd7d>
- Kokalj, D., Debus, J., Stangier, D., Moldenhauer, H., Nikolov, A., Wittig, A., Brümmer, A., & Tillmann, W. (2020). Controlling the structural, mechanical and frictional properties of MoS_x coatings by high-power impulse magnetron sputtering. *Coatings*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/COATINGS10080755>
- Kolobov, A. V., & Tominaga, J. (2016). *Two-Dimensional Transition-Metal Dichalcogenides* (Vol. 239). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31450-1>
- Kumar, R., Hussainova, I., Rahmani, R., & Antonov, M. (2022). Solid Lubrication at High-Temperatures—A Review. *Materials*, 15(5), 1695. <https://doi.org/10.3390/ma15051695>
- Lansdown, A. R. (1982). *Lubrication: a practical guide to lubricant selection*.
- Late, D. J., Liu, B., Matte, H. S. S. R., Rao, C. N. R., & Dravid, V. P. (2012). Rapid Characterization of Ultrathin Layers of Chalcogenides on SiO₂/Si Substrates. *Advanced Functional Materials*, 22(9), 1894–1905. <https://doi.org/10.1002/adfm.201102913>
- Li, H., Wu, J., Yin, Z., & Zhang, H. (2014). Preparation and Applications of Mechanically Exfoliated Single-Layer and Multilayer MoS₂ and WSe₂ Nanosheets. *Accounts of Chemical Research*, 47(4), 1067–1075. <https://doi.org/10.1021/ar4002312>
- Lide, D. R. . (1998). *CRC handbook of chemistry and physics : a ready-reference book of chemical and physical data*. CRC Press.
- Liu, H., Zhu, Y., Meng, Q., Lu, X., Kong, S., Huang, Z., Jiang, P., & Bao, X. (2017). Role of the carrier gas flow rate in monolayer MoS₂ growth by modified chemical vapor deposition. *Nano Research*, 10(2), 643–651. <https://doi.org/10.1007/s12274-016-1323-3>

- Liu, N., Kim, P., Kim, J. H., Ye, J. H., Kim, S., & Lee, C. J. (2014). Large-area atomically thin MoS₂ nanosheets prepared using electrochemical exfoliation. *ACS Nano*, 8(7), 6902–6910. <https://doi.org/10.1021/nn5016242>
- Ma, L., Chen, W.-X., Li, H., Zheng, Y.-F., & Xu, Z.-D. (2008). Ionic liquid-assisted hydrothermal synthesis of MoS₂ microspheres. *Materials Letters*, 62(6–7), 797–799. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.06.062>
- Magda, G. Z., Pető, J., Dobrik, G., Hwang, C., Biró, L. P., & Tapasztó, L. (2015). Exfoliation of large-area transition metal chalcogenide single layers. *Scientific Reports*, 5(1), 14714. <https://doi.org/10.1038/srep14714>
- Mang, T. (2006). Lubricants in the Tribological System. In *Lubricants and Lubrication* (pp. 7–22). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527610341.ch2>
- Martin, J. M., Donnet, C., Le Mogne, T., & Epicier, T. (1993). Superlubricity of molybdenum disulphide. *Physical Review B*, 48(14). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.48.10583>
- Martin, J. M., Pascal, H., Donnet, C., Le Mogne, T., Loubet, J. L., & Epicier, T. (1994). Superlubricity of MoS₂: crystal orientation mechanisms. *Surface and Coatings Technology*, 68–69(C). [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)90197-X](https://doi.org/10.1016/0257-8972(94)90197-X)
- Martínez-Jódar, A., Villar-Rodil, S., Munuera, J. M., Castro-Muñiz, A., Coleman, J. N., Raymundo-Piñero, E., & Paredes, J. I. (2024). Two-Dimensional MoS₂ Nanosheets Derived from Cathodic Exfoliation for Lithium Storage Applications. *Nanomaterials*, 14(11), 932. <https://doi.org/10.3390/nano14110932>
- Matthews, A., Franklin, S., & Holmberg, K. (2007). Tribological coatings: contact mechanisms and selection. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(18), 5463–5475. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/18/S07>
- Meng, F., Yang, C., & Han, H. (2018). Study on tribological performances of MoS₂ coating at high temperature. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 232(8), 964–973. <https://doi.org/10.1177/1350650117735272>
- Messier, R., Giri, A. P., & Roy, R. A. (1984). Revised structure zone model for thin film physical structure. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2(2). <https://doi.org/10.1116/1.572604>

- Mittal, D., Singh, D., & Kumar Sharma, S. (2023). Thermal Characteristics and Tribological Performances of Solid Lubricants: A Mini Review. In *Advances in Rheology of Materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.109982>
- Miyake, S., & Wang, M. (2015). Nanoprocessing of layered crystalline materials by atomic force microscopy. *Nanoscale Research Letters*, 10(1), 123. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0811-9>
- Nosonovsky, M. (2007). Oil as a Lubricant in the Ancient Middle East. *Tribology Online*, 2(2), 44–49. <https://doi.org/10.2474/trol.2.44>
- Novoselov, K. S. (2011). Nobel Lecture: Graphene: Materials in the Flatland. *Reviews of Modern Physics*, 83(3), 837–849. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.837>
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., & Firsov, A. A. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306(5696), 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- Novoselov, K. S., Jiang, D., Schedin, F., Booth, T. J., Khotkevich, V. V., Morozov, S. V., & Geim, A. K. (2005). Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(30), 10451–10453. <https://doi.org/10.1073/pnas.0502848102>
- Ouyang, J.-H., Li, Y.-F., Zhang, Y.-Z., Wang, Y.-M., & Wang, Y.-J. (2022). High-Temperature Solid Lubricants and Self-Lubricating Composites: A Critical Review. *Lubricants*, 10(8), 177. <https://doi.org/10.3390/lubricants10080177>
- Owuor, P. S., Khan, A., Leon, C. L. y, Ozden, S., Priestley, R., Arnold, C., Chopra, N., & Tiwary, C. S. (2020). Roadblocks faced by graphene in replacing graphite in large-scale applications. *Oxford Open Materials Science*, 1(1). <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itab004>
- Paradecka, A., Lukaszkowicz, K., Sondor, J., & Pancielejko, M. (2017). Structure and tribological properties of MoS₂ low friction thin films. *ITM Web of Conferences*, 15, 06008. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20171506008>
- Pirarath, R., Shivashanmugam, P., Syed, A., Elgorban, A. M., Anandan, S., & Ashokkumar, M. (2021). Mercury removal from aqueous solution using petal-like MoS₂ nanosheets. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 15(1), 15. <https://doi.org/10.1007/s11783-020-1307-0>

- Prabhakar Vattikuti, S. V., Byon, C., Venkata Reddy, Ch., Venkatesh, B., & Shim, J. (2015). Synthesis and structural characterization of MoS₂ nanospheres and nanosheets using solvothermal method. *Journal of Materials Science*, 50(14), 5024–5038. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9051-8>
- Prasad, P. M., Mankhand, T. R., & Prasad, A. J. K. (1997). Molybdenum extraction process: an overview. *NML Technical Journal*, 39(2).
- Py, M. A., & Haering, R. R. (1983). Structural destabilization induced by lithium intercalation in MoS₂ and related compounds. *Canadian Journal of Physics*, 61(1), 76–84. <https://doi.org/10.1139/p83-013>
- Reeves, C. J., Menezes, P. L., Lovell, M. R., & Jen, T.-C. (2013). Tribology of Solid Lubricants. In *Tribology for Scientists and Engineers* (pp. 447–494). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1945-7_13
- Renevier, N. M., Fox, V. C., Teer, D. G., & Hampshire, J. (2000). Coating characteristics and tribological properties of sputter-deposited MoS₂/metal composite coatings deposited by closed field unbalanced magnetron sputter ion plating. *Surface and Coatings Technology*, 127(1). [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00538-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00538-7)
- Rennie, G. (1829). Experiments on the friction and abrasion of the surfaces of solids. *Journal of the Franklin Institute*, 8(6). [https://doi.org/10.1016/s0016-0032\(29\)90535-4](https://doi.org/10.1016/s0016-0032(29)90535-4)
- Saliba, M., Atanas, J. P., Howayek, T. M., & Habchi, R. (2023). Molybdenum disulfide, exfoliation methods and applications to photocatalysis: a review. *Nanoscale Advances*, 5(24), 6787–6803. <https://doi.org/10.1039/D3NA00741C>
- Samy, O., Zeng, S., Birowosuto, M. D., & El Moutaouakil, A. (2021). A Review on MoS₂ Properties, Synthesis, Sensing Applications and Challenges. *Crystals*, 11(4), 355. <https://doi.org/10.3390/cryst11040355>
- Sarma, P., & Borah, A. (2025). Solid Lubricants in Sustainable Manufacturing: A Review of Processing Techniques, Materials and Applications. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 22(4), 12837–12856. <https://doi.org/10.15282/ijame.22.4.2025.1.0978>
- Scharf, T. W., & Prasad, S. V. (2013). Solid lubricants: a review. *Journal of Materials Science*, 48(2), 511–531. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-7038-2>

- Scheler, T., Illgner, P., Kups, T., Linkenheil, A., Knauer, A., Blum, M., Ziegler, M., & Schaaf, P. (2025). Analysis of RF magnetron sputtered MoS₂ thin films for electronic application: Influence of the sputter power to film growth and composition. *Vacuum*, 241, 114629. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114629>
- Simmonds, M. C., Savan, A., Van Swygenhoven, H., & Pflüger, E. (1999). Characterisation of magnetron sputter deposited MoS_x/metal multilayers. *Thin Solid Films*, 354(1–2), 59–65. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00565-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00565-9)
- Siu, J. H. W., & Li, L. K. Y. (2000). An investigation of the effect of surface roughness and coating thickness on the friction and wear behaviour of a commercial MoS₂-metal coating on AISI 400C steel. *Wear*, 237(2). [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00349-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00349-X)
- Sliney, H. E. (1982). Solid lubricant materials for high temperatures-a review. *Tribology International*, 15(5). [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(82\)90089-5](https://doi.org/10.1016/0301-679X(82)90089-5)
- Spalvins, T. (1984). Frictional and morphological properties of AuMoS₂ films sputtered from a compact target. *Thin Solid Films*, 118(3). [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(84\)90207-4](https://doi.org/10.1016/0040-6090(84)90207-4)
- Spalvins, T. (1992). Lubrication with sputtered MoS₂ films: Principles, operation, and limitations. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1(3). <https://doi.org/10.1007/BF02652388>
- Stupp, B. C. (1981). Synergistic effects of metals co-sputtered with MoS₂. *Thin Solid Films*, 84(3). [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(81\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0040-6090(81)90023-7)
- Sun, J., Li, X., Guo, W., Zhao, M., Fan, X., Dong, Y., Xu, C., Deng, J., & Fu, Y. (2017). Synthesis Methods of Two-Dimensional MoS₂: A Brief Review. *Crystals*, 7(7), 198. <https://doi.org/10.3390/cryst7070198>
- Sun, X. (2013). Solid Lubricants for Space Mechanisms. In *Encyclopedia of Tribology*. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_1230
- Sutor, P. (1991). Solid Lubricants: Overview and Recent Developments. *MRS Bulletin*, 16(5), 24–30. <https://doi.org/10.1557/S0883769400056864>
- Tan, C., Cao, X., Wu, X.-J., He, Q., Yang, J., Zhang, X., Chen, J., Zhao, W., Han, S., Nam, G.-H., Sindoro, M., & Zhang, H. (2017). Recent Advances in

- Ultrathin Two-Dimensional Nanomaterials. *Chemical Reviews*, 117(9), 6225–6331. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00558>
- Tang, D.-M., Kvashnin, D. G., Najmaei, S., Bando, Y., Kimoto, K., Koskinen, P., Ajayan, P. M., Yakobson, B. I., Sorokin, P. B., Lou, J., & Golberg, D. (2014). Nanomechanical cleavage of molybdenum disulphide atomic layers. *Nature Communications*, 5(1), 3631. <https://doi.org/10.1038/ncomms4631>
- Teer, D. G. (2001). New solid lubricant coatings. *Wear*, 250–251(PART 2). [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(01\)00764-5](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(01)00764-5)
- The Climax molybdenum deposit, Colorado, with a section on history, production, metallurgy, and development.* (1933). <https://doi.org/10.3133/b846C>
- Thornton, J. A. (1974). INFLUENCE OF APPARATUS GEOMETRY AND DEPOSITION CONDITIONS ON THE STRUCTURE AND TOPOGRAPHY OF THICK SPUTTERED COATINGS. *J Vac Sci Technol*, 11(4). <https://doi.org/10.1116/1.1312732>
- Tian, C., Cai, H., & Xue, Y. (2022). Effect of Working Pressure on Tribological Properties of Ce-Ti/MoS₂ Coatings Using Magnetron Sputter. *Coatings*, 12(10), 1576. <https://doi.org/10.3390/coatings12101576>
- Tripathy, P. K., & Rakhasia, R. H. (2006). Chemical processing of a low grade molybdenite concentrate to recover molybdenum. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 115(1), 8–14. <https://doi.org/10.1179/174328506X91329>
- Tummala, P., Lamperti, A., Alia, M., Kozma, E., Nobili, L. G., & Molle, A. (2020). Application-Oriented Growth of a Molybdenum Disulfide (MoS₂) Single Layer by Means of Parametrically Optimized Chemical Vapor Deposition. *Materials*, 13(12), 2786. <https://doi.org/10.3390/ma13122786>
- Vazirisereshk, M. R., Martini, A., Strubbe, D. A., & Baykara, M. Z. (2019). Solid Lubrication with MoS₂: A Review. *Lubricants*, 7(7), 57. <https://doi.org/10.3390/lubricants7070057>
- Vierneusel, B., Schneider, T., Tremmel, S., Wartzack, S., & Gradt, T. (2013). Humidity resistant MoS₂ coatings deposited by unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.07.019>

- Vierneusel, B., Tremmel, S., & Wartzack, S. (2012). Effects of deposition parameters on hardness and lubrication properties of thin MoS₂ films. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 43(12), 1029–1035. <https://doi.org/10.1002/mawe.201200942>
- Vierneusel, B., Tremmel, S., & Wartzack, S. (2015). Monte Carlo simulation of the MoS₂ sputtering process and the influence of the normalized momentum on residual stresses. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 33(6). <https://doi.org/10.1116/1.4926383>
- Wang, D. Y., Chang, C. L., Chen, Z. Y., & Ho, W. Y. (1999). Microstructural and tribological characterization of MoS₂-Ti composite solid lubricating films. *Surface and Coatings Technology*, 120–121. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00431-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00431-4)
- Wang, L., Chen, F., & Ji, X. (2017). Shape consistency of MoS₂ flakes grown using chemical vapor deposition. *Applied Physics Express*, 10(6), 065201. <https://doi.org/10.7567/APEX.10.065201>
- Wang, W., Zeng, X., Wu, S., Zeng, Y., Hu, Y., Ding, J., & Xu, S. (2017). Effect of Mo concentration on shape and size of monolayer MoS₂ crystals by chemical vapor deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(39), 395501. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa81ae>
- Weise, G., Mattern, N., Hermann, H., Teresiak, A., Bächer, I., Brückner, W., Bauer, H. D., Vinzelberg, H., Reiss, G., Kreissig, U., Mäder, M., & Markschräger, P. (1997). Preparation, structure and properties of MoS_x films. *Thin Solid Films*, 298(1–2). [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(96\)09165-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(96)09165-1)
- Weise, G., Teresiak, A., Bächer, I., Markschräger, P., & Kampschulte, G. (1995). Influence of magnetron sputtering process parameters on wear properties of steel/Cr₃Si or Cr/MoS_x. *Surface and Coatings Technology*, 76–77(PART 2). [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02605-3](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02605-3)
- Wisniak, J. (2010). The History of Catalysis. From the Beginning to Nobel Prizes. *Educación Química*, 21(1), 60–69. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30074-0](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30074-0)
- Zeng, Z., Yin, Z., Huang, X., Li, H., He, Q., Lu, G., Boey, F., & Zhang, H. (2011). Single-Layer Semiconducting Nanosheets: High-Yield Preparation and Device Fabrication. *Angewandte Chemie*, 123(47), 11289–11293. <https://doi.org/10.1002/ange.201106004>

- Zhang, X., Vitchev, R. G., Lauwerens, W., Stals, L., He, J., & Celis, J. P. (2001). Effect of crystallographic orientation on fretting wear behaviour of MoS_x coatings in dry and humid air. *Thin Solid Films*, 396(1–2). [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01141-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01141-5)
- Zhang, Y., Li, P., Ji, L., Liu, X., Wan, H., Chen, L., Li, H., & Jin, Z. (2021). Tribological properties of MoS₂ coating for ultra-long wear-life and low coefficient of friction combined with additive g-C₃N₄ in air. *Friction*, 9(4), 789–801. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0374-3>
- Zhang, Y., Zhai, Y., Li, J., & Fang, W. (2023). The Improvement of the Mechanical Exfoliation Method to Prepare Impurity-free Few-layer MoS₂. *2023 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO)*, 477–481. <https://doi.org/10.1109/3M-NANO58613.2023.10305379>
- Zhu, X., Su, Z., Wu, C., Cong, H., Ai, X., Yang, H., & Qian, J. (2022). Exfoliation of MoS₂Nanosheets Enabled by a Redox-Potential-Matched Chemical Lithiation Reaction. *Nano Letters*, 22(7). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c00148>
- Zhu, Z., You, J., Zhu, D., Jiang, G., Zhan, S., Wen, J., & Xia, Q. (2021). Effect of precursor ratio on the morphological and optical properties of CVD-grown monolayer MoS₂ nanosheets. *Materials Research Express*, 8(4), 045008. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abf3df>

BÖLÜM 2

FARKLI MALZEMELERDEN ÜRETİLMİŞ CIVATA TIPLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

HAYAT SILA VELİ ¹

KAAN YER ²

FARSHID KHOSRAVI ³

Giriş

Cıvatalar, iki veya daha fazla makine elemanını birleştirmek amacıyla kullanılan en yaygın bağlantı elemanlarıdır. Bu elemanların güvenilirliği, sistemin genel dayanımı ve çalışma süresi üzerinde doğrudan etkilidir. Bir cıvatanın performansını; malzeme yapısı, dış geometrisi, ön yükleme miktarı, yüzey koşulları ve çevresel etkenler belirler. Bu nedenle doğru malzeme seçimi, güvenli ve uzun ömürlü bir bağlantı tasarımı için büyük önem taşımaktadır.

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, e-mail: 2540171003@ogr.cbu.edu.tr, ORCID: 0009-0003-2003-016X

² Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, e-mail: 2540171005@ogr.cbu.edu.tr, ORCID: 0009-0002-9803-2301

³ Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, e-mail: farshid.khosravi09@gmail.com, ORCID: 0000-0002-886-114X.

Günümüzde elik, paslanmaz elik, alüminyum alaşımları, titanyum ve kompozit/polimer esaslı malzemeler, farklı mühendislik alanlarında cıvata üretiminde kullanılmaktadır. Her malzemenin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları vardır. Örneğın elik cıvatalar yüksek dayanım ve düşük maliyet nedeniyle sanayi uygulamalarında yaygındır. Paslanmaz elik, korozyon direnci sayesinde denizcilik ve kimya endüstrilerinde tercih edilir. Alüminyum alaşımları hafiflik avantajı sunarken, titanyum cıvatalar yüksek dayanım-ağırlık oranı sayesinde havacılık ve biyomedikal sistemlerde kullanılır. Kompozit ve polimer esaslı cıvatalar ise metalik türlere alternatif olarak, yalıtım ve kimyasal direnç gerektiren yapılarda ne çıkar.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, malzeme türünün yalnızca cıvatanın dayanımını değil, rijitlik, yorulma davranışı ve uzun dönemli yük taşıma performansını da etkilediğini göstermektedir. Deneysel alışmalar ile sonlu elemanlar analizlerinin (FEA) karşılaştırılması, bu tür bağlantıların davranışını anlamada güçlü bir yöntem olarak kullanılmaktadır. FEA sonuçlarının deneysel verilerle büyük ölçüde uyum göstermesi, sayısal analizlerin mühendislik tasarımlarında güvenle uygulanabileceğini kanıtlamıştır. Bu çalışmanın amacı, literatürde yer alan güncel deneysel ve sayısal veriler ışığında farklı cıvata malzemelerinin mekanik özelliklerini karşılaştırmak ve mühendislik tasarımlarında optimum malzeme seçimine yönelik bir değerlendirme sunmaktır. Böylece, bağlantı elemanlarının sistem performansına etkisini daha bütüncül bir yaklaşımla ortaya koymak hedeflenmiştir.

Cıvata eşitleri

elik Cıvatalar

elik cıvatalar, yüksek çekme dayanımı ve tekrarlı yükler altındaki stabil davranışları nedeniyle makine elemanlarında ve özellikle taşıyıcı elemanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak

cıvata; bağlantının rijitliği, malzeme elastisite modülü, dış geometrisi, ön yük ve yüzey koşulları gibi çok sayıda parametreden etkilenmektedir. Son yıllarda yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, bu parametrelerin cıvata performansına etkisini detaylı olarak ortaya koymaktadır.

Ding ve Elkady (2025), yüksek dayanımlı karbon çelik cıvataların çekme yükü altındaki davranışını belirsizlikler ve yükleme hızı etkilerini dikkate alan genelleştirilmiş bir yay modeli ile incelemiştir. Önerilen model, elastik-plastik davranışın daha gerçekçi biçimde temsil edilmesini sağlamaktadır (Ding vd. 2025).

Duysak ve Yavuz, 2023 (2023), S235 çelik cıvataların performansı Tablo 1’de de karşılaştırmalı olarak görüleceği üzere, farklı hasar mekanizmaları üzerinden deneysel ve sayısal yöntemlerle ele alınmıştır. Bu kapsamda; korozyonun mekanik dayanıma etkisini ölçmek amacıyla yapay korozyonlu numunelere eksenel çekme deneyleri uygulanmış, imalat kaynaklı gevrek kırılmaların kök nedenini belirlemek için elektron mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir (Duysak & Yavuz, 2023).

Stranghöner ve arkadaşları (2024), karbon çelik cıvatalar için çekme, kesme ve birleşik yükleme durumlarını kapsayan yeni tasarım yaklaşımlarını ele almıştır. Deneysel veriler mevcut tasarım standartları ile karşılaştırılmıştır (Stranghöner vd. 2024)

Szlosarek ve arkadaşları (2023), çelik cıvatalı bağlantılarda fretting yorulmasını deneysel testler ve sonlu eleman analizleri ile incelemiştir. Temas basıncı ve mikro kaymaların yorulma hasarı üzerindeki etkileri detaylandırılmıştır. Bu çalışma, fretting yorulması mekanizmalarının açıklanmasında temel bir referans oluşturmaktadır. (Szlosarek vd. 2023)

Tablo 1. Çelik Cıvataların Bağlantılarının Karşılaştırılması

Kaynak	Malzeme	FEA veya Analitik Sonuç
Ding & Elkaşov (2025)	Yüksek dayanımlı karbon çelik	Genelleştirilmiş yay modeli
Duysak ve Yavuz (2023)	S235 Çelik	Deney + FEA
Stranghöner et al. (2024)	Yapısal karbon çeliği	Deney + tasarım modeli
Szolnarek et al. (2023)	Çelik cıvatalı bağlantı	Deney + FEA

Tablo 2. Çelik Cıvataların Bağlantılarının Rijitlik/Gerilme Karşılaştırması

Kaynak	Rijitlik/Gerilme Karşılaştırması
Ding & Elkaşov (2025)	Klasik lineer yay modelleri rijitliği %15–25 fazla tahmin ederken, önerilen model gerilme dağılımını daha gerçekçi vermektedir.
Duysak ve Yavuz (2023)	Korozyon hasarı, bağlantı rijitliğini düşürürken cıvata ve plaka üzerindeki maksimum gerilmeleri artırmıştır.
Stranghöner et al. (2024)	Bileşik yükleme durumlarında efektif rijitlik düşmekte, mevcut standartlar gerilmeleri olduğundan düşük tahmin etmektedir.
Szolnarek et al. (2023)	Fretting etkisiyle temas rijitliği azalmakta, lokal temas gerilmeleri belirgin biçimde artmaktadır.

Tablo 2’de çelik cıvatalı bağlantıların yapısal performansı incelendiğinde, rijitlik ve gerilme davranışının kullanılan analiz yöntemine ve çevresel hasar mekanizmalarına son derece duyarlı olduğu görülmektedir. Ding ve Elkaşov (2025), geleneksel lineer yay modellerinin rijitliği %15-25 oranında olduğundan fazla tahmin ettiğini belirleyerek, gerilme dağılımının doğru tespiti için gelişmiş modelleme tekniklerinin şart olduğunu ortaya koymuştur. Fiziksel hasar mekanizmalarını inceleyen Duysak ve Yavuz, (2023), korozyonun sadece kesit kaybı yaratmadığını, aynı zamanda bağlantı

rijitliğini düşürerek cıvata ve plaka üzerindeki maksimum gerilmeleri artırdığını raporlamıştır. Benzer bir rijitlik kaybı, Szolnarek et al. (2023) tarafından fretting (aşınma) yorulması etkisiyle temas yüzeylerinde gözlemlenmiş ve bu durumun lokal gerilmeleri şiddetlendirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca Stranghöner et al. (2024), mevcut standartların bileşik yükleme durumlarında efektif rijitlikteki düşüşü öngörmede yetersiz kaldığını ve gerilmeleri düşük tahmin ederek güvenlik riski oluşturduğunu vurgulamıştır.

Paslanmaz Çelik Cıvatalar

Paslanmaz çelik, yüksek süneklik ve belirgin şekil değiştirme sertleşmesi özellikleriyle, karbon çeliklerinden daha mekanik bir davranış sergiler. Yang ve arkadaşları (2015), 6 mm kalınlığında paslanmaz çelik plakalarda çift kesmeli bir cıvatalı basit bağlar oluşturarak bir çalışma yapmış ve paslanmaz çeliğin taşıma kapasitesi ile deformasyon karakteristiği üzerine inceleme gerçekleştirmiştir. Deneysel sonuçlar, başlangıç rijitliğinin malzeme plastik bölge alanındaki enerji emme kapasitesinde yüksek bir karbon çeliğin bağlarına ulaşana kadar aynı seviyede olduğunu ancak yükleme seviyesinde yük arttıkça bu kapasitenin de büyüdüğünü göstermektedir. Bu, paslanmaz çelikte plastik deformasyon ve eritme düşük akma ve çekme ilişkisine bağlı uzama kapasitesi % 40’a kadar ve $F_y/F_u \approx 0.6-0.7$ ’dir.

Paslanmaz çelik cıvatalar, korozyon direnci ve uzun süreli mekanik kararlılığı sayesinde denizcilik, kimya ve gıda endüstrisi gibi birçok ortamda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak bu tür cıvataların rijitlik, ön yük kaybı ve yorulma davranışları; malzemenin östenitik, ferritik veya mikroyapısına göre farklılık göstermektedir. Yapılan deneysel çalışmalar, özellikle yüksek sıcaklıkta ve korozyon ortamlarında yük aktarım karakteristiğinin değiştiğini ortaya koymuştur.

Hu ve arkadaşları (2019), östenitik paslanmaz çelik cıvataların Tablo 3'te de malzemelri karşılaştırmalı göreceğiniz üzere yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki mekanik davranışlarını incelemiştir. Çalışmada sıcaklık artışıyla birlikte dayanım ve rijitlikte meydana gelen değişimler deneysel olarak ortaya konmuştur (Hu vd. 2019). Wang, Uy, Li ve Song (2020), paslanmaz çelik cıvataların çekme ve kesme yükleri altındaki yorulma davranışını incelemiştir. Yükleme türünün yorulma ömrü üzerindeki etkileri açık biçimde ortaya konmuştur (Wang vd. 2020).

Stranghöner et al. (2023), östenitik paslanmaz çelik cıvataların değişken genlikli yükleme altındaki yorulma davranışını incelemiştir. Yük geçmişinin yorulma ömrü üzerindeki belirleyici etkisi ortaya konmuştur. Bu çalışma, gerçek servis koşullarına yakın yorulma senaryolarının değerlendirilmesini desteklemektedir. (Stranghöner vd. 2023)

Tablo 3. Paslanmaz Çelik Cıvataların Bağlantılarının Karşılaştırılması

Kaynak	Malzeme	FEA veya Analitik Sonuç
Hu et al. (2019)	Östenitik paslanmaz çelik	-
Wang et al. (2020)	Paslanmaz çelik cıvata	Deney + analitik
Stranghöner et al. (2023)	Östenitik paslanmaz çelik	Deney + yorulma modeli

Tablo 4. Paslanmaz Çelik Cıvataların Rijitlik / Gerilme Karşılaştırılması

Kaynak	Rijitlik / Gerilme Karşılaştırılması
Hu et al. (2019)	Yüksek sıcaklık sonrası elastisite modülü düşmekte, rijitlik ve maksimum taşıma gerilmesi azalmaktadır
Wang et al. (2020)	Çekme yüklemesi altında daha yüksek rijitlik korunurken, kesme yüklemesi gerilme yığılmasını artırmaktadır

Tablo 4’te paslanmaz çelik cıvataların rijitlik ve gerilme dağılımı özellikleri karşılaştırması incelendiğinde, malzemenin sünek yapısının ve yükleme koşullarının performansı doğrudan belirlediği görülmektedir (Tablo 4). Wang et al. (2020), çekme yüklerinde rijitlik korunurken, kesme yüklemelerinde gerilme yığılmalarının arttığına dikkat çekmiş; Hu et al. (2019) ise yüksek sıcaklık maruziyetinin elastisite modülünü düşürerek hem rijitlik hem de taşıma kapasitesinde kayıplara yol açtığını raporlamıştır. Ayrıca dinamik yükleri inceleyen Stranghöner et al. (2023), değişken genlikli yüklemelerde rijitlik sabit kalsa dahi, gerilme birikiminin yorulma ömrünü olumsuz etkilediğini belirlemiştir. Bu bulgular, paslanmaz çelik bağlantı tasarımında sadece statik çekme dayanımının değil; kesme kuvvetleri, termal etkiler ve yorulma faktörlerinin de bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Alüminyum Alaşımlı Cıvatalar

Alüminyum alaşımlı cıvatalar, düşük yoğunluk (2.7 g/cm^3) ve yüksek özgül dayanım avantajı nedeniyle otomotiv, havacılık ve spor ekipmanlarında çokça tercih edilmektedir. Ancak çeliğe kıyasla daha düşük elastisite modülü ($E \approx 70 \text{ GPa}$) ve akma dayanımına ($\approx 300\text{--}400 \text{ MPa}$) sahip olması sebebiyle rijitlik kayıpları görülebilmektedir. Ayrıca temas yüzeylerinde plastik deformasyon eğilimi yüksek olduğu için sonlu elemanlar analizlerinde temas bölgesi modellemesi kritik önem taşır.

Hashimura ve arkadaşları (2024), bu çalışma, A5056 ve A6056 serisi alüminyum alaşımlı cıvataların yorulma dayanımını Tablo 5’te görüleceği üzere deneysel olarak incelemiş ve elasto-plastik sonlu elemanlar analizi ile doğrulamıştır. Çelik cıvatalardan farklı olarak, alüminyum cıvatalarda sıkma kuvvetinin ortalama gerilmeyi

düşürdüğü ve yorulma ömrünü etkilediği, özellikle diş dibindeki lokal plastik deformasyonun bu davranışta belirleyici olduğu tespit edilmiştir. (Hashimura vd. 2020)

Fallahnezhad ve arkadaşları (2015), Al 2024-T3 alüminyum alaşım plakalarla oluşturulan çift kaplamalı cıvatalı bağlantıların mekanik davranışı ve kırılma modlarını hem deneysel testler hem de üç boyutlu FEA analizleri ile incelemiştir. Deneysel sonuçlar, çift ve tek cıvata sistemlerinde taşıma kapasitesinin, geometrik parametrelerin ve yük dağılımının nasıl değiştiğini ortaya koyar. (Fallahnezhad vd. 2015)

Berger ve arkadaşları (2005), otomotiv ve havacılıkta kullanılan EN AW 6013, 6056 ve 7075 serisi alüminyum cıvataların oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki (120°C-150°C) davranışları kıyaslanmıştır. 7000 serisi alaşımların yüksek mukavemet sunmasına rağmen sıcaklık artışıyla belirgin dayanım kaybı yaşadığı (%18'e varan), 6000 serisinin ise daha stabil kaldığı deneysel verilerle ortaya konmuştur (Berger vd. 2005).

Oskouei ve arkadaşları (2012), Al 7075-T6 cıvatalı bağlantılarda fretting yorulmasını azaltmak amacıyla elektroless Ni-P kaplamaların etkisini incelemiştir. Kaplamanın yorulma ömrünü anlamlı ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Bu çalışma, fretting yorulması ve yüzey modifikasyonlarının etkilerinin değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır (Oskouei vd. 2012).

Tablo 5. Alüminyum Alaşımlı Cıvataların Bağlantılarının Karşılaştırması

Kaynak	Malzeme	FEA veya Analitik Sonuç
Hashimura et al. (2020)	A5056 & A6066 Alüminyum Alaşımı	Deney + Elasto-Plastik FEA (Lokal deformasyon analizi)

Fallahnezhad et al. (2015)	Al 2024-T3 alüminyum alaşım	3B FEA: Delik çevresindeki gerilme yığılmaları ve yük paylaşımı başarıyla modellenmiş; deneysel sonuçlarla uyum doğrulanmıştır.
Berger et al. (2005)	EN AW 6013, 6056, 7075	Deney + Analitik Karşılaştırma (Sıcaklık etkisi modellenmesi)
Oskouei & Ibrahim (2012)	Al 7075-T6 (Ni-P kaplamalı)	Deney + FEA (izotropik / ortotropik karşılaştırma)

Tablo 6. Alüminyum Alaşımli Cıvataların Rijitlik / Gerilme Karşılaştırılması

Kaynak	Rijitlik / Gerilme Karşılaştırılması
Hashimura et al. (2020)	Cıvata dış diplerindeki lokal plastik deformasyon (shakedown), efektif ortalama gerilmeyi düşürerek gevşeme rijitliğini etkilemekte ve yorulma ömrünü uzatmaktadır.
Fallahnezhad et al. (2015)	Alüminyum alaşım bağlantılarda daha düşük elastisite modülü, bağlantı rijitliğini düşürmekte; ancak bu durum delik çevresindeki gerilme yığılmalarını yayarak hasarın daha kontrollü ilerlemesini sağlamaktadır. Çift cıvatalı konfigürasyonlarda yük paylaşımı iyileşmiş ve nihai kapasite artmıştır.
Berger et al. (2005)	7075 alaşımı oda sıcaklığında en yüksek gerilme dayanımını sunarken, 150°C üzerindeki termal yüklerde rijitlik ve dayanım %18 oranında düşüş göstermektedir.
Oskouei & Ibrahim (2012)	Kaplama ile temas rijitliği artmakta, fretting kaynaklı lokal gerilmeler azalmaktadır

Tablo 6’da alüminyum cıvataların rijitlik ve gerilme davranışlarının malzeme yapısı ve çevresel koşullara bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Fallahnezhad et al. (2015), Al 2024-T3 alüminyum alaşım plakalarla oluşturulan çift kaplamalı cıvatalı bağlantıların mekanik davranışını deneysel testler ve üç boyutlu sonlu eleman analizleri ile incelemiştir. Tek ve çift cıvatalı

düzeneklerde taşıma kapasitesi ve hasar modları karşılaştırılmış, delik çevresindeki gerilme yığılmalarının bağlantı geometrisine duyarlı olduğu gösterilmiştir. Sonuçlar, alüminyumun düşük elastik rijitliğinin gerilme dağılımını yumuşatarak hasar ilerlemesini daha kontrollü hâle getirebildiğini ortaya koymaktadır. Sıcaklık etkisini inceleyen Berger et al. (2005) ise alüminyum alaşımlarının 150°C üzerinde belirgin bir performans kaybı (%18) yaşadığını raporlamıştır. Ayrıca Oskoue ve Ibrahim (2012) kaplamaların temas rijitliğini iyileştirerek gerilme yığılmalarını azalttığını belirtirken, Hashimura et al. (2020) dış diplerindeki lokal plastik deformasyonların gerilmeyi daha homojen dağıtarak yorulma ömrünü uzattığını tespit etmiştir. Bu bulgular, tasarımda sadece statik yüklerin değil, termal ve mikroyapısal faktörlerin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

TİTANYUM CİVATALAR

Titanyum cıvatalar, yüksek özgül dayanım, neredeyse mükemmel korozyon direnci ve düşük yoğunlukları sayesinde havacılık, uzay ve biyomedikal gibi uygulama alanlarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ti-6Al-4V en çok tercih edilen alaşımlardan biridir ve yüksek yorulma ömrü ile dikkat çeker. Bununla birlikte, yüksek üretim maliyeti ve yüzey oksit tabakası nedeniyle bağlantı rijitliği çeliğe göre farklı davranışlar gösterir. Deneysel ve sonlu elemanlar tabanlı çalışmalar, bu malzemenin performansını ortaya koymaktadır.

Feng ve arkadaşları (2022), TC4 (Ti-6Al-4V, Tablo 7) yüksek kilitli cıvataların montaj sonrası çekme altındaki kırılma davranışı deneysel testler ve sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir. Ön yük seviyesinin dış diplerindeki gerilme yoğunlaşmasını ve kırılma modunu belirleyici olduğu gösterilmiştir (Feng vd. 2022). Liu ve arkadaşları (2019), Ti-6Al-4V hi-lock cıvataların çekme ve kayma kombinasyonu altındaki dinamik mekanik davranışı analiz

edilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar, yükleme yönü ve hızının kırılma mekanizmasını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur (Liu vd. 2019). MacLeod ve arkadaşları (2025), eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerin çekme ve yorulma performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçların, titanyum cıvata ve vida tipi bağlantıların tasarımında güvenilir malzeme girdisi sunduğu belirtilmiştir (MacLeod vd. 2025).

Spyroglou ve arkadaşları (2018), uzun süreli kullanım sırasında sürünme etkisinin önemli olduğunu vurgulamıştır. Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, yüksek başlangıç rijitliklerine rağmen, titanyum cıvataların uzun süreli ve zorlu çalışma koşulları altında dikkatli bir tasarım ve montaj gerektirdiği anlaşılmaktadır (Spyroglou vd. 2018). Cui, ve arkadaşları (2006), Ti-6Al-4V cıvatalarda meydana gelen kırılma hasarlarını fraktografik analizlerle incelemiştir. Yorulma ve aşırı yükleme kaynaklı hasar türleri net biçimde ortaya konmuştur. Bu çalışma, titanyum cıvatalarda hasar türlerinin sınıflandırılmasına katkı sağlamaktadır (Cui vd. 2006).

Tablo 7. Titanyum Cıvataların Bağlantılarının Karşılaştırılması

Kaynak	Malzeme	FEA veya Analitik Sonuç
Feng et al. (2022)	TC4 (Ti-6Al-4V) Hi-Lock cıvata	Deney + FEA: Dış diplerindeki gerilme yığılmaları ve kırılma mekanizması başarıyla tahmin edilmiştir.
Liu et al. (2019)	Ti-6Al-4V Hi-Lock cıvata	FEA: Yükleme hızı ve yönünün kırılma davranışı üzerindeki etkisi modellenmiştir.
MacLeod et al. (2025)	Ti-6Al-4V (LPBF)	Deneysel doğrulama: Elde edilen verilerin vida/cıvata benzeri bağlantı tasarımlarında güvenle kullanılabileceği gösterilmiştir.

Spyroglo et al. (2018)	Ti-6Al-4V havacılık cıvatası	Servis verisi + analitik
Cui et al. (2006)	Ti-6Al-4V cıvata	Fraktografi ağırlıklı

Tablo 8. Titanyum Cıvataların Bağlantılarının Rijitlik / Gerilme Karşılaştırılması

Kaynak	Rijitlik / Gerilme Karşılaştırılması
Feng et al. (2022)	Ti-6Al-4V (TC4) cıvatalar, çeliğe kıyasla daha düşük elastisite modülüne sahip olmasına rağmen, yüksek mukavemetleri sayesinde yüksek ön yükler altında çalışabilmektedir; ancak dış diplerindeki gerilme yığılmaları kırılma modunu belirleyici olmaktadır.
Liu et al. (2019)	Titanyum hi-lock cıvatalarda rijitlik, yükleme yönü ve hızına bağlı olarak değişmekte; çekme-kayma kombinasyonunda lokal gerilmeler artarak karma kırılma modlarına yol açmaktadır.
MacLeod et al. (2025)	Ti-6Al-4V alaşımının nispeten düşük elastik rijitliği, bağlantı sistemlerinde daha fazla elastik deformasyona izin vermekte; bu durum yorulma performansını olumlu etkileyebilmektedir.
Spyroglo et al. (2018)	Uzun süreli serviste sünme kaynaklı ön yük kaybı oluşmaktadır
Ciu et al. (2006)	Ti-6Al-4V cıvatalar, çeliğe göre daha düşük rijitlik sergilerken yorulma ve aşırı yükleme altında oluşan gerilmelere bağlı kırılma mekanizmaları fraktografik olarak belirlenmiştir

Tablo 8’de yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde, Ti-6Al-4V (TC4) titanyum cıvataların rijitlik–gerilme davranışının çeliğe kıyasla belirgin şekilde farklılaştığı görülmektedir. Titanyum cıvatalar, daha düşük elastisite modülüne sahip olmaları nedeniyle aynı ön yük seviyelerinde daha fazla elastik deformasyon sergilemekte; bu durum bağlantı rijitliğini düşürürken gerilme yığılmalarının daha geniş bir alana yayılmasını sağlamaktadır. Feng

et al. (2022) ve Liu et al. (2019) tarafından gösterildiği üzere, özellikle dış dipleri ve temas bölgelerinde oluşan lokal gerilmeler kırılma modunu belirleyici olmakta ve yükleme yönü ile hızına bağlı olarak karma kırılma mekanizmaları ortaya çıkabilmektedir. Bununla birlikte MacLeod et al. (2025), titanyumun nispeten düşük elastik rijitliğinin yorulma performansını olumlu yönde etkileyebileceğini, çünkü artan elastik uyumluluğun gerilme genliklerini azalttığını ortaya koymuştur. Öte yandan Spyroglou et al. (2018) ve Cui et al. (2006) çalışmalarında, uzun süreli servis koşullarında sürtünme, mikro kayma ve gevşeme etkileri nedeniyle ön yük kaybı ve buna bağlı hasar risklerinin arttığı vurgulanmıştır. Bu bulgular birlikte ele alındığında, titanyum cıvataların yüksek mukavemet avantajına karşın rijitlik, gevşeme ve lokal gerilme yığılmaları açısından dikkatli tasarım ve ön yük kontrolü gerektirdiği sonucuna varılmaktadır.

Kompozit Ve Polimer Tabanlı Cıvatalar

Kompozit ve polimer tabanlı cıvatalar, metal cıvatalara göre daha düşük yoğunluk, korozyon direnci ve elektriksel yalıtkanlık gibi avantajları nedeniyle özellikle havacılık, otomotiv, tıbbi cihaz ve elektronik alanlarında tercih edilmektedir. Ancak bu malzemelerin elastisite modülü düşük olduğu için ($E \approx 5\text{--}25$ GPa), rijitlik ve yük aktarım kapasitesi çeliğe kıyasla daha düşüktür. Ayrıca, polimer zincir yönelimi, fiber oranı ve matris–fiber ara yüzey kalitesi mekanik performansını doğrudan etkiler.

Park ve arkadaşları (2024), karbon/epoksi kompozit levhalarda (Tablo 9.) tek cıvatalı bağlantıların bearing dayanımı ve hasar modları deneysel olarak incelemiştir. Farklı geometrik ve yükleme koşulları altında net-tension, shear-out ve bearing hasar modları tanımlanmıştır. Sonuçlar, kompozit bağlantılarda düşük rijitliğin gerilme dağılımını iyileştirerek hasar ilerlemesini geciktirdiğini göstermektedir (Park vd. 2024). Blier ve arkadaşları

(2024), hibrit bonded–bolted kompozit bağlantıların çekme altındaki mekanik davranışı deneysel ve sayısal olarak değerlendirilmiştir. Cıvata ön gerilmesi ve yapıştırıcı katkısının bağlantı rijitliği ve yük paylaşımı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Hibrit bağlantıların, yalnız cıvatalı sistemlere kıyasla daha yüksek başlangıç rijitliği sağladığı belirlenmiştir (Blier vd. 2024).

Akbarpour ve arkadaşları (2021), CFRP (Tablo 9.) kompozitlerde cıvatalı bağlantıların performansını artırmaya yönelik deneysel ve sonlu eleman analizleri gerçekleştirmiştir. Delik geometrisi ve sıkma kuvvetinin gerilme yığılmaları ve hasar başlangıcı üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Bulgular, uygun montaj parametrelerinin bağlantı rijitliğini ve taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırabildiğini göstermektedir (Akbarpour vd. 2021). Gopalan ve arkadaşları (2024), CFRP–titanyum hibrit cıvatalı bağlantıların çekme altındaki mekanik davranışı deneysel ve sayısal olarak analiz etmiştir. Kompozit–metal ara yüzeyindeki gerilme transferi ve hasar başlangıcı ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Çalışma, rijitlik uyumsuzluğunun lokal gerilme yoğunlaşmalarına neden olduğunu ve tasarımda dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Gopalan vd. 2024).

Tablo 9. Kompozit ve Polimer Tabanlı Cıvataların Bağlantılarının Karşılaştırılması

Kaynak	Malzeme	FEA veya Analitik Sonuç
Park et al. (2024)	Karbon/Epoksi (CFRP) kompozit levha + çelik cıvata	Deney + FEA: Hasar modlarının yük-sehim ilişkisi ve lokal gerilme alanları sayısal olarak doğrulanmıştır.
Blier et al. (2024)	CFRP kompozit (hibrit bonded–bolted bağlantı)	FEA: Bağlı–cıvatalı hibrit bağlantılarda rijitlik artışı ve yük paylaşımı modellenmiştir.
Akbarpour et al. (2021)	CFRP laminat + metal cıvata	Deney + FEA: Delik çevresindeki gerilme yığılmaları ve hasar ilerlemesi tahmin edilmiştir.

Gopalan et al. (2024)	CFRP–Titanyum hibrit bolted bağlantı	Deney + FEA: Kompozit–metal ara yüzeyindeki gerilme transferi başarıyla tahmin edilmiştir.
-----------------------	--------------------------------------	--

Tablo 10. Kompozit ve Polimer Tabanlı Cıvataların Rijitlik / Gerilme Karşılaştırılması

Kaynak	Rijitlik / Gerilme Karşılaştırılması
Park et al. (2024)	CFRP cıvatalı bağlantılarda düşük elastisite modülü, bearing bölgesinde daha yayılı gerilme dağılımı sağlayarak gevrek kırılma riskini azaltmaktadır.
Blier et al. (2024)	Hibrit bonded–bolted sistemler, yalnız cıvatalı bağlantılara kıyasla daha yüksek başlangıç rijitliği ve daha dengeli yük paylaşımı sunmaktadır.
Akbarpour et al. (2021)	Kompozit bağlantılarda delik çevresindeki lokal rijitlik düşüşü, gerilme yığılmalarının ana belirleyicisi olarak tanımlanmıştır.
Gopalan et al. (2024)	CFRP–titanyum hibrit bağlantılarda rijitlik uyumsuzluğu, ara yüzeyde lokal gerilme yoğunlaşmalarına yol açmaktadır.

Tablo 10’da daha detaylı görüldüğü gibi, kompozit ve polimer tabanlı cıvatalı bağlantılar, düşük elastisite modülleri nedeniyle metal bağlantılara kıyasla daha düşük başlangıç rijitliği sergilemekte; ancak bu durum gerilme yığılmalarını azaltarak hasarın daha kontrollü ilerlemesini sağlamaktadır. Özellikle hibrit bağlantı sistemleri, rijitlik ve yük paylaşımı açısından avantaj sunmaktadır.

Malzeme Türüne Göre Davranış Karşılaştırması

Farklı malzeme türlerinden üretilen cıvatalar, uygulama koşullarına bağlı olarak değişen performans sergiler. Çelik cıvatalar, genel amaçlı mühendislik uygulamalarında yüksek dayanım ve

ekonomik üretim avantajıyla ön plana çıkar (Stranghöner vd., 2024). Paslanmaz çelik cıvatalar ise özellikle çevresel etkilerin belirleyici olduğu sistemlerde uzun ömür ve güvenilirlik sağlar. Alüminyum cıvatalar, hafiflik öncelikli tasarımlarda enerji verimliliği ve performans dengesi sunarken (Berger vd., 2005), titanyum cıvatalar bu iki özelliği birleştirerek yüksek performanslı sistemlerde optimum çözüm oluşturur (Cui vd., 2006). Kompozit ve polimer cıvatalar ise metalik bağlantılara alternatif olarak, özellikle korozyon veya elektriksel yalıtım gereksinimi olan hafif yapılarda kullanılır (Stranghöner vd., 2023). Yani malzeme seçimi yalnızca mekanik dayanım kriterine değil; çalışma ortamı, sıcaklık, korozyon riski, ağırlık kısıtı ve maliyet parametrelerine göre bütüncül bir mühendislik yaklaşımıyla yapılmalıdır. Bu değerlendirme, doğru cıvata malzemesinin seçilmesinin bağlantı performansını doğrudan etkilediğini ve sistemin güvenilirliğini belirleyen en kritik faktörlerden biri olduğunu ortaya koymaktadır.

Cıvatalar, makine elemanlarının birleştirilmesinde en yaygın kullanılan mekanik bağlantı elemanlarıdır ve seçilen malzeme türü, bağlantının performansını doğrudan etkileyen temel unsurlardan biridir. Malzeme seçimi; yük taşıma kapasitesi, çevresel dayanım, maliyet ve rijitlik gibi kriterlere göre yapılır (Stranghöner vd., 2024). Bu kapsamda çelik, paslanmaz çelik, alüminyum alaşımları, titanyum ve kompozit/polimer esaslı cıvatalar mühendislik uygulamalarında en sık kullanılan türlerdir (Ding & Elkady, 2025).

Çelik cıvatalar, mühendislik uygulamalarında en yaygın ve güvenilir seçenek olarak öne çıkar. Yüksek rijitliğe ve değişen dayanım değerlerine sahip olmaları, onları ağır makine montajları, çelik yapılar ve enerji santralleri gibi yüksek yük taşıma kapasitesi gerektiren sistemlerde ideal hale getirir (Stranghöner vd., 2024; Ding & Elkady, 2025). Üretim süreçlerinin oturmuş olması, düşük maliyetli seri üretimi kolaylaştırır. Bununla birlikte, çelik cıvatalar korozyona karşı hassastır ve nemli ya da kimyasal ortamlarda mutlaka yüzey kaplama gerektirir (Duysak & Yavuz, 2023). Sonlu

elemanlar analizleri ile deneysel sonuçlar arasındaki uyumun yüksek olduğu ve farkların genellikle sınırlı kaldığı literatürde rapor edilmiştir (Ding & Elkady, 2025). Genel olarak çelik cıvatalar, yüksek dayanım ve düşük maliyet dengesi açısından en ekonomik ve güvenilir seçenektir.

Paslanmaz çelik cıvatalar ise korozyon, nem ve kimyasal etkiler karşısında yüksek dirençleriyle öne çıkar. Bu özellikleri sayesinde gıda, kimya, denizcilik ve dış ortam yapılarında yaygın olarak tercih edilir (Hu vd., 2019). Çeliğe göre daha düşük rijitliğe sahiptirler ve yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybı görülebilir (Wang vd., 2020). Buna rağmen, bakım gerektirmemesi ve uzun servis ömrü bu dezavantajı büyük ölçüde telafi eder. Sonlu elemanlar analizleri ile deneysel ölçümler arasındaki farkların sınırlı düzeyde kaldığı bildirilmektedir. Bu nedenle paslanmaz çelik cıvatalar, dayanım yerine uzun ömür ve çevresel stabilite öncelikli sistemlerde tercih edilmektedir.

Alüminyum alaşımlı cıvatalar, düşük yoğunlukları (yaklaşık 2.7 g/cm^3) sayesinde yüksek özgül dayanım sağlar. Otomotiv, havacılık, bisiklet ve drone uygulamaları gibi ağırlığın kritik olduğu sistemlerde büyük avantaj sunarlar. Ancak rijitlikleri nispeten düşüktür ve sıcaklık artışıyla birlikte rijitlikte azalma meydana gelebilir (Berger vd., 2005; Fallahnezhad vd., 2015). Ayrıca gevşeme eğilimleri yüksek olduğundan yüksek yüklü bağlantılarda kullanımları sınırlıdır. Sonlu elemanlar analizleri ile deneysel sonuçlar arasındaki farkların literatürde kabul edilebilir seviyelerde olduğu rapor edilmiştir (Berger vd., 2005). Bu nedenle alüminyum cıvatalar, yüksek yük taşıyan bağlantılardan ziyade hafiflik ve enerji verimliliği öncelikli uygulamalarda kullanılmaktadır.

Titanyum cıvatalar, yüksek özgül dayanım ($\rho = 4.5 \text{ g/cm}^3$; $\sigma_u \approx 900 \text{ MPa}$) ve mükemmel korozyon direnciyle öne çıkan gelişmiş bağlantı elemanlarıdır. Düşük gevşeme eğilimleri ve yüksek mekanik kararlılıkları nedeniyle havacılık, savunma sanayi ve biyomedikal uygulamalarda kullanılırlar (Cui vd., 2006; Liu vd.,

2019). Rijitlik bakımından elik cıvatalara oldukça yakındır. Ancak retim maliyetleri yüksektir ve yüzey işlemeleri zor, diş sürtünmeleri ise fazladır. (Spyroglou vd., 2018). Deneysel ve sayısal çalışmalar, titanyum cıvatalar için sonlu elemanlar analizleri ile test sonuçları arasında yüksek uyum bulunduğunu göstermektedir (Feng vd., 2022). Yüksek mukavemet ile düşük ağırlığın birlikte gerekli olduğu kritik sistemlerde titanyum cıvatalar etkin bir çözüm sunmaktadır. Yüksek mukavemet ile düşük ağırlığın birlikte gerekli olduğu kritik sistemlerde titanyum cıvatalar en uygun çözümlerden biridir.

Kompozit ve polimer esaslı cıvatalar, son yıllarda özellikle hafiflik, korozyon direnci ve elektriksel yalıtkanlık avantajları nedeniyle ilgi görmektedir (Park vd., 2024). Düşük yoğunlukları ($1.2\text{--}1.6\text{ g/cm}^3$) onları elektronik sistemler, tıbbi cihazlar ve kimyasal ortamlarda tercih edilir hale getirir. Ancak düşük rijitlikleri ve uzun süreli yük altında deformasyona yatkın olmaları sebebiyle yüksek yük taşıyan bağlantılarda kullanımları sınırlıdır (Zhou, 2015). Deneysel ve sayısal çalışmalar, metalik cıvatalara kıyasla daha düşük mekanik performans sergilediklerini ortaya koymaktadır (Akbarpour & Hallström, 2021). Buna rağmen hafiflik ve yalıtım gereksinimi bulunan ikincil bağlantılarda önemli bir alternatif oluşturmaktadırlar. Metal cıvatalara göre daha düşük rijitlik sergileseler de hafiflik ve yalıtım avantajı sayesinde ikincil bağlantı elemanı olarak önemli bir alternatif oluştururlar.

Genel bir değerlendirme yapıldığı zaman, farklı malzemelerden üretilen cıvatalar kullanım alanlarına ve çevresel koşullara göre değişen performans sergiler. elik cıvatalar dayanım ve maliyet açısından genel mühendislik uygulamaları için en uygun seçenek olarak saptanabilir. Paslanmaz elik cıvatalar uzun ömür ve çevresel dayanım gerektiren alanlarda daha çok kullanılabilir durumdayken, alüminyum cıvatalar hafiflik odaklı sistemlerde önemli avantaj sunar. Titanyum cıvatalar bu iki özelliği birleştirerek yüksek performanslı sistemlerde en minimal düzeyde çözümü

oluşturur. Kompozit ve polimer cıvatalar ise özellikle yalıtım ve korozyon direnci gerektiren hafif yapılar da tercih edilir. Bu bilgiler ışığında, cıvata malzemesi seçimi yalnızca mekanik dayanım üzerinden değil; çalışma ortamı, sıcaklık, korozyon riski, ağırlık kısıtı ve maliyet gibi faktörler bir arada değerlendirilerek yapılmalıdır. Doğru malzeme seçimi, sistemin uzun ömürlü, güvenli ve verimli çalışmasını sağlayan en temel mühendislik adımlarından biridir.

Sonuçlar Ve Yorumlar

Toplanan deneysel veriler ve literatürdeki genel eğilim birlikte değerlendirildikten sonra, farklı malzeme türlerinden üretilen cıvataların mekanik, fiziksel ve ekonomik özellikler açısından farklı avantaj ve sınırlamalara sahip olduğu görülmektedir. Bu durum mühendislik uygulamalarında cıvata malzemesi seçiminin sadece dayanım değerlerine indirgenemeyeceğini; kullanım koşulları, çevresel faktörler ve maliyet dengesi gibi faktörlerin de birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

elik ve paslanmaz elik cıvataları karşılaştırırken, her iki malzemenin de yüksek bir elastisite modülüne (yaklaşık 210 GPa ve 190 GPa) sahip olduğu ve bağlantı rijitliği açısından aynı büyüklükte davrandığı söylenebilir. Paslanmaz elik cıvatalar, yüksek korozyon direnci nedeniyle dış ve kimyasal koşullarda daha istikrarlı performans sergilerken, yüksek sıcaklık dayanımı ve nispeten düşük maliyeti nedeniyle endüstriyel uygulamalarda elik cıvatalar daha çok tercih edilmektedir. Yorulma davranışı açısından, elik cıvataların genellikle daha yüksek performans sunduğu, paslanmaz elik cıvataların ise düşük bakım gereksinimleri ile uzun süreli kullanımda avantaj sağladığı belirtilebilir.

Alüminyum alaşımlı cıvatalar, yaklaşık 2,7 g / cm³'lük düşük yoğunlukları nedeniyle yüksek özgül mukavemet sunar ve bu özelliği ile otomotiv, havacılık ve mobil sistemler gibi hafif uygulamalarda öne çıkar. Bununla birlikte, elastisite modülünün yaklaşık 70 GPA seviyesinde olması, bu cıvatanın yüksek sertlik gerektiren bağlantılarda kullanımını sınırlar. Ek olarak, artan sıcaklıkla deformasyon ve gevşeme gösterme eğilimleri, tasarım aşamasında dikkate alınması gereken bir diğer önemli husustur.

Titanyum cıvatalar, yüksek özgül mukavemetleri ve yapısal stabiliteyi ile diğer malzeme grupları arasında öne çıkmaktadır. Yaklaşık 110 Gpa'lık elastisite modülü sayesinde yüksek mukavemet ve yeterli elastik davranış sunan cıvatalar, yüksek özgül mukavemeti ve yapısal stabilitesi ile diğer malzeme grupları arasında öne çıkmaktadır. Üstün korozyon direnci nedeniyle havacılık, savunma sanayi ve biyomedikal uygulamalarda tercih edilmesine rağmen, yüksek üretim maliyetleri bu cıvataların kritik sistemler için kullanımını büyük ölçüde sınırlandırmaktadır.

Kompozit ve polimer esaslı cıvatalar, metal cıvatalara kıyasla daha düşük mekanik performans sergiler. Kompozit ve polimer esaslı cıvatalar, metal cıvatalara kıyasla daha düşük mekanik performans sergiler. Yoğunluk yaklaşık 1,2-1,6 g / cm³'tür ve düşük kompozit ve polimer esaslı cıvatalar metal cıvatalara kıyasla daha düşük mekanik performans sergiler. Yaklaşık 1,2-1,6 g / cm³ yoğunluğu ve düşük elastisite modülü (5-25 GPA), bu tür cıvataların yüksek yük taşıma gerektiren bağlantılarda kullanımını sınırlar. Öte yandan yüksek korozyon direnci, elektrik yalıtımı ve kimyasal stabilite gibi özellikleri sayesinde elektronik, kimyasal ve tıbbi uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu nedenle polimer kompozitler ve cıvatalar, bağlayıcılar daha uygun fiyatlı alternatifler olan ikincil veya yüksek yük taşıma sistemleri olarak tasarlanmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde elik cıvatalar, yüksek taşıma kapasitesi ve ekonomikliği ile genel mühendislik uygulamalarında ne çıkmaktadır. Paslanmaz elik cıvatalar genel olarak değerlendirilmesi gereken sistemlerde daha stabil bir çözüm sunarken, elik cıvatalar yüksek taşıma kapasitesi ve ekonomikliği nedeniyle genel mühendislik uygulamalarında ne çıkmaktadır. Paslanmaz elik cıvatalar, uzun servis ömrü ve evre direnci gerektiren sistemlerde daha kararlı bir çözüm sunarken, alüminyum alaşımlı cıvatalar hafif odaklı tasarımlarda önemli avantajlar sağlar. Titanyum cıvatalar, yüksek performans gerektiren kritik uygulamalarda tercih edilirken, Kompozit ve polimer Cıvatalar, zel çevresel gereksinimlerin bulunduğu metal cıvatalara alternatiftir. Bu bağlamda Cıvata malzemesi seçiminin tek bir mekanik kritere dayanmadan çok boyutlu mühendislik değerlendirmesi ile yapılması gerektiği açıktır.

Kaynakça

Akbarpour, S., & Hallström, S. (2021). Enhancing the performance of bolted joints in composites by use of patched steel or titanium inserts. *Composite Structures*, 275, 114464. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114464>

Berger, C., Arz, U., & Seybold, R. (2005). Strength behaviour of aluminium bolts under static and cyclic loading. In *Proceedings of the 3rd FLAIR Conference on Aluminium Alloys* (pp. 70-76). Monash University.

Blier, R., Al-Ghalib, A. A., & Bakhach, S. (2024). The tensile behavior of hybrid bonded bolted composite joints. *Materials*, 17(7), 1675. <https://doi.org/10.3390/ma17071675>

Cui, Y., Meng, Q., Zhang, B., & Yan, F. (2006). Fracture analysis of Ti-6Al-4V bolts. *Engineering Failure Analysis*, 13(4), 669–672. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.10.016>

Ding, Z., & Elkady, A. (2025). Generalized spring model for steel bolts in tension considering uncertainty and loading speed. *Journal of Constructional Steel Research*, 231, 109574. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109574>

Duysak, Y., & Yavuz, G. (2023). Structural behavior of steel bolted connections having different types of corrosion damage. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 9(1), 37–45. <https://doi.org/10.30855/gmbd.0705050>

Fallahnezhad, K., Steele, A., & Oskouei, R. H. (2015). Failure mode analysis of aluminium alloy 2024-T3 in double-lap bolted joints with single and double fasteners; A numerical and experimental study. *Materials*, 8(6), 3195–3209. <https://doi.org/10.3390/ma8063195>

Feng, D., He, P., Xu, Z., & Han, Y. (2022). Fracture mode transition during assembly of TC4 high-lock bolt under tensile load: Experimental and finite element analysis. *Materials*, 15(12), 4049. <https://doi.org/10.3390/ma15124049>

Gopalan, R., Al-Mazrouei, M., & Palani, K. A. (2024). Experimental and numerical investigation of tensile-loaded CFRP–titanium composite hybrid joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 38(6), 651–670. <https://doi.org/10.1080/01694243.2023.2282825>

Hashimura T. Et al (2024) Fatigue strength of steel–aluminum alloy dissimilar lap joints fabricated by dimple spot welding for automotive application. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 47(3), 1–13. <https://doi.org/10.1111/ffe.14227>

Hu, Y., Tang, S.-L., George, A. K., Tao, Z., Wang, X.-Q., & Thai, H.-T. (2019). Behaviour of stainless steel bolts after exposure

to elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 157, 371–385. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.02.021>

Liu, X., Zhao, Z., Shen, C., Lin, X., Deng, H., & Liang, M. (2019). Dynamic response and failure mechanism of Ti-6Al-4V hi-lock bolts under combined tensile-shear loading. *International Journal of Impact Engineering*, 131, 103316. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.04.025>

MacLeod, A. R., Stamboulis, A., & Caine, M. P. (2025). Additively produced Ti-6Al-4V osteosynthesis devices meet the requirements for tensile strength and fatigue. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(7), 227. <https://doi.org/10.3390/jmmp9070227>

Oskouei, R. H., & Ibrahim, R. N. (2012). Improving fretting fatigue behaviour of Al 7075-T6 bolted plates using electroless Ni-P coatings. *International Journal of Fatigue*, 44, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.05.003>

Park, S. M., Jeon, J. H., & Choi, W. J. (2024). Study on bearing strength and failure modes of single bolted joint carbon/epoxy composite materials. *Polymers*, 16(6), 847. <https://doi.org/10.3390/polym16060847>

Spyroglou, I., Kourousis, K. I., & Koutsomichalis, A. (2018). Investigation of in-service creep failures of aircraft Ti-6Al-4V bolts. *MATEC Web of Conferences*, 188, 04008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818804008>

Stranghöner, N., Abraham, C., & Ehrhardt, L. (2024). New design approaches for tension, shear and interaction resistance of carbon steel bolts. *Journal of Constructional Steel Research*, 212, 108260. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108260>

Stranghöner, N., Marx, S., Ummenhofer, T., & Bucher, V. (2023). Fatigue resistance of austenitic stainless steel bolts under variable amplitude loading. CE/Papers. <https://doi.org/10.1002/cepa.2351>

Szlosarek, R., Holzmüller, P., & Kröger, M. (2023). Analyzing the fretting fatigue of bolt joints by experiments and finite element analysis. Lubricants, 11(8), Article 348. <https://doi.org/10.3390/lubricants11080348>

Wang, J., Uy, B., Li, D., & Song, Y. (2020). Fatigue behaviour of stainless steel bolts in tension and shear under constant-amplitude loading. International Journal of Fatigue, 133, 105401. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105401>

Zhou, S. (2015). Multiaxial fatigue life prediction of composite bolted joint under constant amplitude cycle loading. Composites Part B: Engineering, 74, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.013>

BÖLÜM 3

EKLEMELİ İMALATTA YENİ YAKLAŞIMLAR VE EĞİLİMLER

1. MAHMUT ÖZER¹

Giriş

Eklemeli imalat, sağladığı tasarım serbestliği, malzeme kullanımında verimlilik ve karmaşık geometrilerin doğrudan üretilebilmesi gibi avantajları nedeniyle son yıllarda hızla gelişen bir üretim yaklaşımıdır. Dijital tasarımdan üretime uzanan süreç zinciri, ürün geliştirme döngülerinin kısalmasına ve kişiselleştirilmiş tasarımların uygulanmasına imkân verir. Eklemeli imalat yöntemleriyle başlangıçta polimer malzemeler yaygın biçimde işlenmiş olsa da günümüzde metal, seramik ve bunların kompozitlerinin üretimine yönelik yöntem ve uygulama çeşitliliği belirgin biçimde artmıştır (Zhou vd., 2024).

Öte yandan, eklemeli imalat önemli avantajlar sunsa da üretim kalitesi, tekrarlanabilirlik, süreç stabilitesi ve endüstriyel ölçekte verimlilik açısından hâlen kritik sınırlılıklar barındırmaktadır. Katmanlı üretim mantığına bağlı olarak yüzey kalitesi, boyutsal hassasiyet ve mekanik anizotropi gibi sorunlar

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Amasya Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-2273-4449

birçok uygulamada performansı sınırlandırabilmektedir. Özellikle metal eklemeli imalatta enerji girdisi ve termal çevrimlerin karmaşıklığı; kusur oluşumu, deformasyon ve süreç kontrolü gibi konularda ilave zorluklar doğurabilmektedir (Yang vd., 2024). Bu bağlamda, hedeflenen performansın sağlanabilmesi için ardıl işlemlere duyulan ihtiyaç, toplam üretim süresi ve maliyet üzerinde belirleyici bir etki yaratabilmektedir.

Üretilebilecek malzemeler açısından incelendiğinde eklemeli imalatın polimerler, metaller, seramikler ve kompozitler gibi geniş bir yelpazeye yayıldığı görülmektedir. Ancak malzeme sınıfı genişlese dahi, üretim kalitesi belirli bir seviyeye ulaşmış olsa bile yüzey kusurları, süreç kaynaklı düzensizlikler ve boyutsal sapmalar gibi sorunların tamamen ortadan kaldırılması her zaman mümkün olmayabilmektedir. Metal eklemeli imalatın lazer tabanlı uygulamalarında, süreç penceresinin daralması ve termal etkilerin artması nedeniyle kusur kontrolü ve boyutsal kararlılık gibi başlıkların daha da kritik hâle gelebildiği vurgulanmaktadır. Bu nedenle yüzey kalitesinin iyileştirilmesi, kusurların azaltılması ve süreç güvenilirliğinin artırılması gibi konular üzerine araştırmaların sürdüğü görülmektedir(Frazier, 2014; Lee vd., 2017).

Kısmen standartlaşmış eklemeli imalat yöntemlerinin yanı sıra, günümüzde yeni metotların araştırılması; üretim hızının artırılması, destek ihtiyacının azaltılması, daha düşük ısı etkileriyle üretim yapılması, mikro-ölçekli üretim kabiliyetinin geliştirilmesi, süreç izleme-kontrol yeteneklerinin güçlendirilmesi ve fonksiyonel/çok malzemeli yapılara geçiş gibi gerekçelerle ivme kazanmıştır. Bu eğilim, metal eklemeli imalatta büyük ölçekli üretim, çok malzemeli üretim, alan-destekli yaklaşımlar ve hibrit üretim mimarilerinin önem kazanmasıyla da örtüşmektedir(Fidan vd., 2023; Yang vd., 2024). Ayrıca, akıllı malzemeler ve uyarana duyarlı sistemler üzerinden 3B baskıdan 4B baskıya uzanan yönelim, eklemeli imalatta geometri üretiminin ötesinde fonksiyon

kazandırma odağını belirgin biçimde güçlendirmektedir. Bu bağlamda literatürde öne çıkan yeni üretim yaklaşımları; katmanlı üretim paradigmasını yeniden yorumlayan Hacimsel Eklemeli İmalat (Volumetric Additive Manufacturing) ve dinamik arayüz temelli hızlı reçine süreçleri, elektro-kimyasal biriktirme temelli Eklemeli İmalat (ECAM), katı-hal metal biriktirme ailesinde Soğuk Sprey Eklemeli İmalat (Cold Spray AM) ve Additive Friction Stir Deposition (AFSD), alan-tahrikli üretim yaklaşımı olarak akustik/holografik ses alanı ile sono printing, mikro-ölçek üretim için çip-tabanlı fotonik yazdırma mimarileri, reaksiyon-cephesi tabanlı “büyüyerek üretim” (frontal polimerleşme/growth printing) ve şablon-dönüşüm temelli hidrojel infüzyon yaklaşımları ile sıvı metal yazdırma gibi fonksiyonel baskı hatlarını kapsamaktadır (Franco Urquiza, 2024; Yang vd., 2024; Zhou vd., 2024).

Hacimsel Eklemeli İmalat

Hacimsel eklemeli imalat (ing. volumetric additive manufacturing), klasik katman-katman üretimden farklı olarak fotokürlenebilir bir ortamın hacmi içinde hedef geometriye karşılık gelen bölgelerin, farklı açılardan uygulanan ışık desenleriyle “doz eşiği” prensibine göre seçici biçimde kürlenmesiyle parçanın tek bir üretim çevriminde oluşturulmasını hedefleyen katmansız bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım; destek gereksinimini azaltma, boşluklu/karmaşık geometrileri daha erişilebilir kılma ve üretim sürelerini saniye–dakika ölçeğine çekebilme potansiyeli nedeniyle 2020 sonrası literatürde hızla görünür hâle gelmiştir (Whyte, Doeven, Sutti, Kouzani, & Adams, 2024).

Volumetrik 3B baskının mekanistik olarak incelendiği çalışmada, süreç “piksel düzeyindeki ışık desenlerinin voxel düzeyinde hacimsel katılaşmaya dönüşümü” üzerinden ele alınmış ve hacim içinde seçiciliğin sağlanabilmesi için fotokimyasal ve/veya optik süreçlerde doğrusal olmayan (nonlinear) eşik davranışı

gerekliliği vurgulanmıştır. Bu kapsamda amaç, volumetrik üretim yaklaşımlarını ortak bir fizik/kimya çerçevesinde tanımlamak, yöntem ailelerini sınıflandırmak ve “volume-at-once” retiminki hangi mekanizmalarla mümkün hâle geldiğini açıklamaktır. Yapılan değerlendirmeye göre, volumetrik baskıda başarı; ışık alanı tasarımı, reçine kinetiği ve eşik/doz penceresinin birlikte yönetilmesine bağlı olup, bu bileşenlerin uyumlu olmadığı durumlarda hedef dışı bölgelerde istenmeyen kürlenme veya hedef bölgelerde yetersiz katılaşma gibi hataların ortaya çıkabildiği belirtilmiştir (Thijssen, Toombs, Li, Taylor, & Van Vlierberghe, 2023).

Sürekli hacimsel retiminki ele alındığı çalışmada ise, dual-color fotopolimerizasyon temelli xolography yaklaşımı “akış içinde” sürekli üretime uyarlanmış ve bunun için özel bir akış hücresi mimarisi geliştirilmiştir. Bu yöntemde hedef, sürekli akan reçine içerisinde baskı bölgesinin akış profilini kontrol ederek ışık tabakasının neden olabileceği istenmeyen polimerizasyonu azaltmak ve kararlı bir sürekli üretim penceresi oluşturmaktır. Üretilen numuneler geometri doğruluğu ve yüzey przszlğu açısından değerlendirilmiş; farklı parçaların sürekli ve “true-to-shape” biçimde üretilbildiği, minimum tanınabilir özellik boyutlarının x/y yönünde yaklaşık 10 m ve z yönünde 25 m mertebesine indiği raporlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, paralel üretimle ölçeklenebilirlik vurgulanırken sunulan akış hücresi için üretim hızının 1,75 mm³/s düzeyine ulaşabildiği belirtilmiştir (Stüwe vd., 2024).

Holografik tomografik hacimsel eklemeli imalatın incelendiği çalışmada, tomografik VAM’inki temel prensibi olan “ok açılı projeksiyonlarla doz biriktirerek hedef bölgede polimerizasyon eşiğini açma” yaklaşımı korunmuş; ışık motoru tarafında ise holografik faz modülasyonu kullanılarak projeksiyon veriminin artırılması hedeflenmiştir. Çalışmada amaç, genlik kodlamaya kıyasla daha yüksek ışık verimliliği sağlayarak hem düşük gte

üretimi mümkün kılmak hem de baskı hacmi boyunca ışık kontrolünü hassaslaştırmaktır. Üretilen numuneler mikroyapısal çözünürlük ve özellik boyutu açısından değerlendirilmiş; 40 mW ışık kaynağıyla bir dakikadan kısa sürede milimetrik parçaların üretilebildiği ve 31 µm mertebesinde negatif özelliklerin elde edilebildiği raporlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, faz kodlamanın projeksiyon verimini belirgin biçimde artırdığı ve speckle gürültüsünün kontrolüyle hedef–hedef dışı kontrastın iyileştirilebildiği gösterilmiştir (Álvarez-Castaño vd., 2025).

Genel olarak bu çalışmalar, hacimsel eklemeli imalatın “katmansız ve hızlı üretim” vaadini iki ana hatta geliştirdiğini göstermektedir: (i) süreç seçiciliğini güvence altına alan mekanistik/kimyasal çerçevenin (eşik, nonlineerlik, reçine kinetiği) netleştirilmesi ve malzeme penceresinin genişletilmesi, (ii) optik motor ve üretim mimarisinin (sürekli akış, paralelleştirme, holografik projeksiyon) ölçeklenebilirlik ve verim açısından olgunlaştırılması. Buna karşılık, yöntemin yaygınlaşmasında malzeme uyumluluğu, ekipman karmaşıklığı ve karşılaştırılabilir parametre/performans raporlaması gibi konuların hâlen belirleyici araştırma başlıkları olarak öne çıktığı değerlendirilmektedir.

Elektro-kimyasal Eklemeli İmalat

Elektrokimyasal eklemeli imalat (ECAM), metal iyonlarının elektrolit çözeltilerde elektriksel potansiyel farkı ile indirgenerek yüzey üzerinde katmanlı biçimde biriktirilmesine dayanan bir üretim yaklaşımıdır. Isıl ergitmeye dayalı yöntemlere kıyasla düşük sıcaklıkta işlem yapılabilmesi, yoğun ve çatlak riski düşük metal yapılar üretme potansiyeli ve mikro-ölçekli üretimlerde yüksek hassasiyet sağlaması nedeniyle son yıllarda artan ilgi görmektedir. (Ayalew, Han, & Sakairi, 2023).

Üç boyutlu mikro-özelliklerin üretiminin incelendiği çalışmada, nozul ile katot yüzeyi arasında kararlı bir “elektrolit

sütunu” oluşturularak lokalize elektrokimyasal biriktirme gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım ile U, Z ve spiral gibi serbest formlu mikro-yapıların üretildiği; geometrik doğruluğun ve yüzey kalitesinin, elektrolit kolonunun stabilitesi ve biriktirme akımının kontrolüyle doğrudan ilişkili olduğu gösterilmiştir (Wei vd., 2022)

Gümüş ve nikel mikro-yapılarının üretildiği çalışmada, mikrokanaallı bir cantilever-nozula dayalı FluidFM yaklaşımı kullanılarak elektrolitin kontrollü taşınması ve hedef bölgede katmanlı biriktirme sağlanmıştır. Halka, helis ve tripod gibi kompleks mikro-geometriler üretilmiş; biriktirme hızlarının gümüş için 7–40 nm/s ve nikel için 27–42 nm/s aralığında değiştiği raporlanmış; üretilen yapıların yoğunluğu ve kimyasal saflığı analitik yöntemlerle doğrulanmıştır (van Nisselroy, Shen, Zambelli, & Momotenko, 2022).

Bakırın epitaksiyel grafen üzerinde elektrokimyasal biriktirilmesinin ele alındığı çalışmada, çekirdeklenme ve büyüme kinetiği deneysel elektrokimya ölçümleri ve hesaplamalı analizlerle incelenmiştir. Sonuçlar, biriktirmenin sınırlı sayıda çekirdeklenme noktasında gerçekleşen “anlık çekirdeklenme” davranışıyla uyumlu olduğunu ve difüzyonun süreç kinetiğinde belirleyici rol oynadığını göstermiş; bu çerçevenin grafen–metal ara yüzeylerinin kontrollü tasarımına katkı sunabileceği tartışılmıştır (Shtepliuk, Vagin, & Yakimova, 2020).

Genel olarak bu çalışmalar, ECAM’in lokalize elektrolit geometrileri ve mikro-nozul temelli sistemlerle mikro-ölçekli 3B metal yapıların üretiminde güçlü bir aday olduğunu göstermektedir. Literatürde yöntem geliştirme eğilimi; kütle taşınımının kararlı yönetimi, akım/gerilim dalga şekillerinin hassas kontrolü, farklı metal sistemlerine uyarlanabilirlik ve geometrik doğruluğu sınırlayan kararsızlıkların azaltılması eksenlerinde yoğunlaşmaktadır.

Eklemleri Sürtünme Karıştırma Biriktirme

Eklemleri sürtünme karıştırma biriktirme (ing. Additive friction stir deposition, AFSD), katı hâl eklemleri imalat yaklaşımı olup besleme malzemesinin dönen takım altında sürtünme ısı ve yoğun plastik deformasyonla yumuşatılarak altlık/önceki katman üzerine tabaka tabaka biriktirilmesine dayanır. Ergitme-katılaşma çevrimi olmadığı için sıcak çatlak, element ayrışması ve yüksek artık gerilme gibi füzyon tabanlı süreç kusurlarını azaltma potansiyeli taşırken; açık atmosferde üretim, onarım ve geri dönüşüm uygulamalarına uygunluğu ile öne çıkar (I. Liu, Bor, Allison, & Jordon, 2025).

Üç boyutlu kuvvetlerin incelendiği çalışmada, AFSD'nin "kuvvet güdümlü" doğası temel alınarak süreç parametrelerinin eksenel/ilerleme/yanal kuvvet sinyallerine etkisi ve bu sinyallerin yüzey morfolojisi ile mikroyapı üzerinden biriktirme kalitesini nasıl yansıttığı araştırılmıştır. Zaman-frekans alanı özelliklerinden yararlanılarak kusur oluşumunun yetersiz plastikleşme veya AS-RS tarafları arasında düzensiz deformasyonla birlikte seyrettiği gösterilmiş ve kuvvet tabanlı bir kalite tahmin modeli sunulmuştur. (Huang vd., 2025).

IN625 üzerine yapılan çalışmada, çok katmanlı biriktirmede sıcaklık ve şekil değiştirme hızı gibi termo-mekanik özniteliklerin mikroyapıyı nasıl yönlendirdiği ele alınmış; EBSD analizlerinde yapı yönü boyunca ince eş eksenli taneler ve katman arayüzlerinde daha ince tane bantları raporlanmıştır. Gözlemler, dinamik yeniden kristalleşmenin baskın bir restorasyon mekanizması olduğunu ve tane incelmesinin akma dayanımında belirgin artışa katkı verdiğini ortaya koymuştur (Patil vd., 2024).

Al-Mg-Si alaşımı ile bakırın karşılaştırıldığı çalışmada, AFSD'nin ışın tabanlı yöntemlerle yoğun/kararlı üretimi zor

olabilen iki malzemede serbest-form ve tam yoğunluklu yapı üretme kabiliyeti süreç–mikroyapı bağları üzerinden değerlendirilmiştir. Al-Mg-Si’de daha homojen mikroyapı ve güçlü kayma tekstürü gözlenirken, bakırda daha geniş tane boyutu dağılımı ve daha zayıf tekstür raporlanmış; mikroyapı evrim mekanizmalarının malzemenin termo-mekanik yanıtına bağlı olarak farklılaştığı vurgulanmıştır (Griffiths vd., 2021).

Genel olarak bu çalışmalar, AFSD’de iki kritik eksenin öne çıktığını göstermektedir: (i) parametrelerin ısı girdisi ve deformasyon rejimi üzerinden yeniden kristalleşme/tekstür/tane incelmesi gibi mikroyapı çıktıları belirlemesi ve (ii) kuvvet gibi süreç içi sinyallerle kusur oluşumu ile kalite arasındaki ilişkinin sayısallaştırılarak izleme–kontrol yaklaşımlarına taşınması. Bu nedenle AFSD, özellikle alüminyum alaşımlarında süreç–özellik optimizasyonu ile ölçek büyütme ve zor malzemelerde (ör. Ni esaslı süperalaşımlar) güvenilir biriktirme penceresinin tanımlanması açısından güncel ve dinamik bir araştırma hattı sunmaktadır.

Soğuk Püskürtme Eklemeli İmalat

Soğuk spreyc eklemeli imalat (ing. cold spray additive manufacturing), mikron boyutlu metal tozlarının basınçlı bir gaz jetiyle süpersonik hızlara çıkarılarak altlığa çarptırılması ve parçacıkların kritik bir hızın üzerine çıktığında yoğun plastik deformasyonla bağ oluşturması esasına dayanır. İşlem katı hâlde gerçekleştiği için ergimeye bağlı ısı etkileri, oksidasyon ve ısıdan etkilenen bölge gibi problemler sınırlanır; buna karşın tek iz geometrisinin “gaussian benzeri” profil üretmesi ve bunun birikim sırasında dalgalanma/kenar kaybı gibi hatalara yol açması, geometrik doğruluğu (şekil kontrolünü) soğuk spreycin temel darboğazlarından biri hâline getirir (Falco & Bagherifard, 2025).

316L paslanmaz çeliğin soğuk spreyc ile serbest duran (freestanding) birikimler şeklinde üretildiği çalışmada, püskürtme

parametreleri optimize edilerek parçalarda <%1 gözeneklilik ve kütle malzemeye yakın dayanım seviyeleri hedeflenmiş; ayrıca ısıt işlemlerle süneklik ve iç gerilmelerin ayarlanması amaçlanmıştır. Statik ve çevrimsel eksenel yükleme ile yorulma çatlak ilerleme analizleri birlikte değerlendirilmiş; özellikle helyuma kıyasla daha ekonomik olan N₂ gazı ile de yüksek kaliteli 316L birikimlerin elde edilebilirliği ve yorulma dayanımının döküm malzemeye yakın seviyelere taşınabildiği raporlanmıştır (Bagherifard vd., 2021)

Saf bakırın soğuk sprej eklemeli imalatla üretildiği çalışmada, ek bir ardıl işleme ihtiyaç duymadan hem yüksek dayanım hem de yüksek süneklik kombinasyonu elde etmeye odaklanılmıştır. Üretilen Cu numunelerde çekme dayanımı ve uzama değerlerinin sırasıyla 271 MPa ve %43,5 seviyesine ulaştığı; bunun, birikimde oluşan heterojen/bimodal tane yapısı ve yoğun ikizlenme gibi mikroyapısal mekanizmalarla ilişkilendirildiği gösterilmiştir(Chen vd., 2023).

CrMnCoFeNi yüksek entropili alaşım (HEA) için yapılan çalışmada, HEA tozunun üretilmesi sonrası soğuk sprej tek-parçacık çarpma deneyleriyle deformasyon evrimi ve bağ oluşumu incelenmiştir. Sonuçlarda, parçacık çarpma morfolojisinin yalnızca malzeme/mikroyapıya değil aynı zamanda şekil değiştirme hızına da duyarlı olduğu; yaklaşık 200 nm kalınlıkta deformasyon nanotwin'lerinin gözlemlendiği belirtilmiştir. Ayrıca HEA/HEA çiftinde kritik hızın, HEA/Ni ve HEA/Inconel 625 gibi farklı malzeme çiftlerine kıyasla daha yüksek olduğu; bunun da HEA'nın yüksek pekleşme eğiliminin kayma yerelleşmesini geciktirerek bağlanmayı zorlaştırmasıyla açıklandığı raporlanmıştır (Nikbakht vd., 2021).

Soğuk sprejin yalnızca “parça üretimi” değil, ara tabaka/bağlantı mühendisliği için de kullanılabildiğini gösteren çalışmada, Cf/SiC ile GH3536 süperalaşımının birleştirilmesi için Cu–Ti–WC kompozit ara tabakası soğuk sprej eklemeli imalatla hazırlanmıştır. Birikim sırasında Cu ve Ti parçacıklarının

deformasyon/yeniden kristalleşmesi ile WC'nin ezilme-sıkışma davranışının birlikte ara tabaka oluşumunu sağladığı; brazing sıcaklığına çıkmadan önce TiC oluşumunun başladığı ve ~200 nm mertebesinde ultra-ince taneli bölgelerin teşvik edildiği belirtilmiştir. Bu yaklaşım ile eklem bölgesinin kayma dayanımının 112 MPa'a çıktığı ve toz dolguya kıyasla 1,5 kat iyileşme sağlandığı raporlanmıştır(W. Liu vd., 2024).

Genel olarak bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, soğuk sprey eklemeli imalatın “düşük ısı etki + yüksek birikim hızı” avantajıyla; yapısal 316L gibi alaşımlarda çevrimsel yük altında performansın iyileştirilebilmesi, saf Cu gibi malzemelerde mikroyapı tasarımıyla dayanım-süneklik dengesinin kurulabilmesi ve kompozit ara tabaka üretimi üzerinden seramik-metal birleştirmeye uzanan uygulama alanları sunduğu görülmektedir. Buna karşılık, geometrik doğruluk/şekil kontrolü (iz profilinin doğası gereği) hâlen kritik bir sınırlayıcıdır; bu nedenle depozit şeklinin modellenmesi, veri güdümlü kestirim ve gelişmiş takım yolu stratejileri soğuk spreyin yaygın, tekrarlanabilir ve otomasyona uygun bir “net şekil” Eİ yöntemi hâline gelmesinde ana araştırma eksenleri olarak öne çıkmaktadır.

Eklemeli İmalatta Katmansız ve Alan-Tabanlı Yaklaşımlar

Bu gruptaki yaklaşımlar, klasik katmanlı biriktirme mantığını farklı biçimlerde kırarak; ya hacimsel/alan-tabanlı kürleme (holografi, akustik alan), ya kendiliğinden ilerleyen reaksiyon cepheleri (frontal polimerizasyon), ya da alışılmadık baskı ortamları ve malzeme sınıfları (sıvı metalin farklı ortamlarda üretimi) üzerinden hız, ölçeklenebilirlik, çok malzemelilik ve erişilebilirlik gibi eksenlerde yeni olanaklar sunmayı hedefler. Bu nedenle “diğer” başlığı altında, henüz standartlaşma düzeyi daha düşük ama yöntembilim açısından güçlü şekilde farklılaşan üretim modları birlikte ele alınabilir (Agrawal, Zhuang, Dreher, Mitter, &

Ahmed, 2024; Derayatifar, Habibi, Bhat, & Packirisamy, 2024; Shan, Feng, Guo, Wang, & Liu, 2025; Yourdkhani, Masoumipour, Ziaee, Dashtizad, & Dojan, 2025).

Holographic direct sound printing (HDSP) çalışmasında, klasik “tek odaklı” direct sound printing’in voxel-voxel üretim sınırlaması aşılacak istenmiş; bunun için hedef parçanın kesit bilgisini taşıyan akustik hologramlar ile basınç alanı desenlenerek aynı kesitte bölgesel kavitasyon ve bölgesel polimerizasyon gerçekleştirilmiştir. Yöntemin, noktasal DSP’ye göre baskı hızını yaklaşık bir mertebe artırdığı ve katmansız/katman izi zayıf yapılar üretebildiği; ayrıca robotik hareket ile serbest yörüngelerde baskı, çoklu nesne/çoklu malzeme üretimi, porozite ayarı ve uzaktan (engellerin ötesinde) baskı gibi kabiliyetlerin gösterildiği raporlanmıştır (Derayatifar vd., 2024).

Holografik fotopolimerizasyonun mikroakışkan sistemlerle birleştirildiği çalışmada, ışık alanlarının holografik olarak şekillendirilmesiyle fotopolimer reçine içinde tek atımlı (one-shot) hacimsel kütleme yapılarak mikrokanallar ve serbest duran mikro-objelerin üretimi hedeflenmiştir. Yaklaşımın, mikroakışkan kanal içinde (kapiler içinde) doğrudan 3B yapılar oluşturabildiği; akrilat reçineler ve hidrojeller gibi farklı malzemelere uyarlanabilir olduğu ve akış altında mikro-parça üretimi gibi senaryolara genişletilebileceği gösterilmiştir (Lale vd., 2023).

SonoPrint çalışmasında, hacimsel baskı ile kompozit üretimi bir araya getirilmiş; fotoduyarlı reçine içinde parçacık takviyelerin akustik duran dalga alanı ile istenen motiflerde hizalanması ve ardından tüm hacmin birkaç dakika içinde basılması amaçlanmıştır. Cam/metal/polistiren gibi farklı parçacıklarla çizgisel ve çokgen motifler oluşturulabildiği; motif aralığı/kalınlığının akustik konfigürasyonla kontrol edildiği ve hizalı takviye içeren numunelerde mekanik dayanımın rastgele dağılıma göre anlamlı ölçüde arttığı raporlanmıştır (Agrawal vd., 2024).

Morphogenic growth 3D printing çalışmasında, doğadaki morfogeneze ilhamla “growth printing” adı verilen bir yaklaşım önerilmiş; eksotermik bir frontal polimerizasyon cephesinin kendiliğinden ilerlemesiyle reçinenin hızla katılması ve eşzamanlı olarak başlatıcının serbest yüzeye göre hareket ettirilmesiyle parçanın geometrisinin “büyüme planı” mantığında şekillendirilmesi hedeflenmiştir. Sürecin yüksek baskı hızı ve enerji verimliliği vurgulanmış; ayrıca reaksiyon-difüzyon temelli katılaşmayı modelleyerek istenen geometri için ters tasarım (inverse design) yaklaşımı sunulmuştur (Kim vd., 2025).

Frontal polimerizasyonun 3B baskıda daha kontrol edilebilir hâle getirilmesi amaçlanan çalışmada, DIW ile basılan termoset kompozitlerde reaksiyon cephesini başlatmak için temaslı ısı kaynağı yerine lazer tabanlı fototermal ve temassız başlatma gösterilmiştir. Alt-saniye ölçeğinde güvenilir başlatmanın düşük enerji girdisiyle sağlanabildiği; başlatmanın zaman/konum açısından programlanabilir olduğu ve çoklu başlatma ile karmaşık geometrilerde toplam kürleme süresinin azaltılabildiği raporlanmıştır (Yourdkhani vd., 2025).

Pan-media liquid metal 3D printing çalışmasında, sıvı metallerin akışkanlık, iletkenlik ve faz geçişi avantajları üzerinden “her mürekkep–her ortam” fikrini sistematikleştiren bütüncül bir çerçeve önerilmiştir. Baskının yalnızca hava gibi klasik ortamlarda değil; gazlar, sıvılar, yumuşak ortamlar, biyolojik dokular ve daha rijit ortamlar dahil geniş bir medya kütüphanesinde yürütülebileceği; ortam–mürekkep etkileşimine araya sokulan fiziksel/kimyasal işlemlerle şekil sadakati ve fonksiyonelliğin genişletilebileceği tartışılmıştır (Shan vd., 2025).

Sıvı metal baskının güncel ilerlemesini derleyen çalışmada, şablon, santrifüj destekli yöntemler, kalem litografisi ve lazer tabanlı tekniklerle çözünürlüğün nano ölçekte iyileştirilebildiği; ayrıca farklı polimer–sıvı metal kompozit mürekkepler ile

yazdırılabilirlik/iyileşebilirlik/iletkenlik ve dayanımın geliştirildiği özetlenmiştir. Uygulama tarafında esnek sensörler, kataliz, kompozitler, mikro-aktüatörler ve elektrotlar gibi geniş bir yelpazede sıvı metal baskının “fonksiyon üretimi” odaklı bir hat oluşturduğu vurgulanmıştır. (Liang vd., 2023).

Sonuç

Eklemeli imalat, tasarım serbestliği, düşük malzeme israfı ve karmaşık geometrilerin doğrudan üretilebilmesi gibi güçlü avantajlar sunmasına karşın, birçok uygulamada hız, kalite ve tekrarlanabilirlik açısından hâlen kritik sınırlılıklar taşımaktadır. Katmanlı üretim mantığı; destek ihtiyacı, katman izleri, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal sapmalar gibi sorunları beraberinde getirirken, özellikle metal sistemlerde yüksek ısıl girdiye bağlı kusurlar ve artık gerilmeler üretim güvenilirliğini sınırlandırabilmektedir. Bu kısıtlar, Eİ’nin belirli alanlarda prototiplemenin ötesine geçerek güvenilir mühendislik bileşeni üretimi haline gelmesini zorlaştırmakta; bu nedenle alternatif üretim paradigmaları, farklı enerji alanları ve katı hâl biriktirme mekanizmaları üzerinden geliştirilmektedir.

Hacimsel eklemeli imalat, katman-katman üretim yerine hacim içinde seçici kürlenme yaklaşımıyla baskı süresini saniye–dakika ölçeğine çekme ve destek ihtiyacını azaltma potansiyeli taşımaktadır. Ancak bu yaklaşımda malzeme uyumluluğu, eşik/doz penceresinin yönetimi, optik alanın hassas kontrolü ve çözünürlük–ölçek dengesi temel teknik belirleyicilerdir. Elektrokimyasal eklemeli imalat (ECAM) ise düşük sıcaklıkta metal biriktirme avantajıyla özellikle mikro/meso ölçekte hassas yapıların üretiminde öne çıkmakta; buna karşılık kütle taşınımı, elektrolit kararlılığı, hız ve ölçek büyütme gereksinimleri yöntemin yaygınlaşmasını belirleyen konular olarak kalmaktadır.

Katı hâl metal biriktirme ailesinde soğuk sprey eklemeli imalat, parçacıkların yüksek hızla çarpması sonucu oluşan yoğun plastik deformasyon ve bağlanma mekanizmasıyla ergime kaynaklı problemlerin önemli bir bölümünü sınırlayabilmektedir. Buna rağmen geometrik doğruluk ve şekil kontrolü, iz profilinin doğası gereği temel darboğazlardan biridir. Eklemeli sürtünme karıştırma biriktirme (AFSD) ise sürtünme ısısı ve yoğun deformasyonla malzemeyi yumuşatarak biriktirdiği için ergitme–katılaşma çevrimini devre dışı bırakır; alüminyum alaşımlarında ve bazı zor malzemelerde süreç güvenilirliği açısından güçlü bir seçenek sunar. Bununla birlikte katmanlar arası tutarlılık, anizotropi, yüzey kalitesi ve süreç kararlılığı; ayrıca kuvvet tabanlı sinyallerin kalite göstergesi olarak değerlendirilmesi gibi başlıklar gelişimin merkezinde yer almaktadır.

Diğer yükselen yaklaşımlar; akustik/holografik alanlarla hacim içinde şekillendirme, frontal polimerizasyon temelli “büyüyerek üretim” ve farklı ortamlarda sıvı metal yazdırma gibi yöntemlerle hız, çok malzeme ve fonksiyon üretimi ekseninde dikkat çekmektedir. Bu yöntemler, klasik süreçlerin erişemediği üretim modlarını mümkün kılmasına rağmen tekrarlanabilirlik, güvenlik, ölçekte kararlılık ve uygulama-odaklı kalite güvencesi açısından daha erken olgunluk seviyesindedir.

Geliştirme yönü, yöntemlerden bağımsız biçimde dört ortak eksende toplanmaktadır. Birincisi, süreç–yapı–özellik ilişkisinin karşılaştırılabilirliği için raporlama metrikleri ve test protokollerinin netleştirilmesi ve standardizasyonudur. İkincisi, kuvvet/akustik/optik sinyal, elektriksel geri besleme ve sıcaklık gibi süreç içi göstergeler üzerinden izleme ve kapalı çevrim kontrol yaklaşımlarının yaygınlaştırılmasıdır. Üçüncüsü, geometrik doğruluk ve “net şekil” üretim hedefi için fizik tabanlı modelleme, veri güdümlü kestirim ve takım yolu/enerji alanı planlamasının birlikte tasarlanmasıdır. Dördüncüsü ise malzeme tarafının

genişletilmesidir; hacimsel krleme için reçine kinetiği ve eşik penceresi, ECAM için elektrolit ve biriktirme kimyası, soğuk sprej/AFSD için alaşım–arayüz mühendisliği ve mikro yapı tasarımı bu genişlemenin temel araçlarıdır.

Bu çerçevede yakın vadede en hızlı etki, onarım ve yakın-net-şekil üretim, mikro-bileşen imalatı, zorlu malzeme sistemleri ve fonksiyonel ara tabaka/yüzey üretimi gibi niş ama yüksek değerli uygulamalarda görülecektir. Orta–uzun vadede ise süreç izleme-kontrol altyapısı, standardizasyon ve malzeme ekosisteminin olgunlaşmasıyla birlikte bu yeni yaklaşımlar, eklemeli imalatın hız, kalite ve güvenilirlik sınırlarını daha ileriye taşıyan tamamlayıcı üretim platformları olarak konumlanacaktır.

Kaynakça

Agrawal, P., Zhuang, S., Dreher, S., Mitter, S., & Ahmed, D. (2024). SonoPrint: Acoustically Assisted Volumetric 3D Printing for Composites. *Advanced Materials*, 36(40). <https://doi.org/10.1002/adma.202408374>

Álvarez-Castaño, M. I., Madsen, A. G., Madrid-Wolff, J., Sgarminato, V., Boniface, A., Glckstad, J., & Moser, C. (2025). Holographic tomographic volumetric additive manufacturing. *Nature Communications*, 16(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56852-4>

Ayalew, A. A., Han, X., & Sakairi, M. (2023, Eylül 5). A critical review of additive material manufacturing through electrochemical deposition techniques. *Additive Manufacturing*, C. 77. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103796>

Bagherifard, S., Kondas, J., Monti, S., Cizek, J., Perego, F., Kovarik, O., ... Guagliano, M. (2021). Tailoring cold spray additive

manufacturing of steel 316 L for static and cyclic load-bearing applications. *Materials and Design*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109575>

Chen, C., Xie, Y., Yin, S., Li, W., Luo, X., Xie, X., ... Ren, Z. (2023). Ductile and high strength Cu fabricated by solid-state cold spray additive manufacturing. *Journal of Materials Science and Technology*, 134, 234-243. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.07.003>

Derayatifar, M., Habibi, M., Bhat, R., & Packirisamy, M. (2024). Holographic direct sound printing. *Nature Communications*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50923-8>

Falco, R., & Bagherifard, S. (2025, Nisan 1). Cold Spray Additive Manufacturing: A Review of Shape Control Challenges and Solutions. *Journal of Thermal Spray Technology*, C. 34, ss. 1023-1041. Springer. <https://doi.org/10.1007/s11666-025-01970-0>

Fidan, I., Huseynov, O., Ali, M. A., Alkunte, S., Rajeshirke, M., Gupta, A., ... Sharma, A. (2023). Recent Inventions in Additive Manufacturing: Holistic Review. *Inventions*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/inventions8040103>

Franco Urquiza, E. A. (2024, Mart 1). Advances in Additive Manufacturing of Polymer-Fused Deposition Modeling on Textiles: From 3D Printing to Innovative 4D Printing—A Review. *Polymers*, C. 16. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/polym16050700>

Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917-1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>

Griffiths, R. J., Garcia, D., Song, J., Vasudevan, V. K., Steiner, M. A., Cai, W., & Yu, H. Z. (2021). Solid-state additive manufacturing

of aluminum and copper using additive friction stir deposition: Process-microstructure linkages. *Materialia*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100967>

Huang, Y., Liu, Q., Zhang, K., Li, M., Yang, T., Yang, L., & Cui, L. (2025). Investigation of three-dimensional forces during additive friction stir deposition — How could force signals reveal the deposition quality? *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104234>

Kim, Y. S., Zhu, M., Hossain, M. T., Sanders, D., Shah, R., Gao, Y., ... Tawfick, S. H. (2025). Morphogenic Growth 3D Printing. *Advanced Materials*, 37(20). <https://doi.org/10.1002/adma.202406265>

Lale, A., Buckley, C., Kermène, V., Desfarges-Berthelemot, A., Dumas-Bouchiat, F., Mignard, E., & Rossignol, F. (2023). Holographic photopolymerization combined to microfluidics for the fabrication of lab-in-lab microdevices and complex 3D micro-objects. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20054>

Lee, H., Lim, C. H. J., Low, M. J., Tham, N., Murukeshan, V. M., & Kim, Y. J. (2017). Lasers in additive manufacturing: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 4(3), 307-322. <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0037-7>

Liang, S., Yang, J., Li, F., Xie, S., Song, N., & Hu, L. (2023, Eylül 6). Recent progress in liquid metal printing and its applications. *RSC Advances*, C. 13, ss. 26650-26662. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d3ra04356h>

Liu, I., Bor, T. C., Allison, P. G., & Jordon, J. B. (2025, Ekim 1). Additive friction stir deposition of aluminum alloys: A critical

review. *Materials and Design*, C. 258. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114543>

Liu, W., Wang, P., Shi, W., Zhao, S., Nai, X., Song, X., ... Li, W. (2024). Achieving ultrafine grain strengthening Cf/SiC-GH3536 joints brazed with Cu-Ti-WC composite interlayer via cold spray additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104258>

Nikbakht, R., Saadati, M., Kim, T. S., Jahazi, M., Kim, H. S., & Jodoin, B. (2021). Cold spray deposition characteristic and bonding of CrMnCoFeNi high entropy alloy. *Surface and Coatings Technology*, 425. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127748>

Patil, S. M., Krishna, K. V. M., Sharma, S., Joshi, S. S., Radhakrishnan, M., Banerjee, R., & Dahotre, N. B. (2024). Thermo-mechanical process variables driven microstructure evolution during additive friction stir deposition of IN625. *Additive Manufacturing*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.103958>

Shan, X., Feng, W., Guo, M., Wang, X., & Liu, J. (2025, Nisan 7). Pan-media liquid metal 3D printing. *Innovation*, C. 6. Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.100813>

Shtepliuk, I., Vagin, M., & Yakimova, R. (2020). Electrochemical deposition of copper on epitaxial graphene. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/app10041405>

Stüwe, L., Geiger, M., Röllgen, F., Heinze, T., Reuter, M., Wessling, M., ... Linkhorst, J. (2024). Continuous Volumetric 3D Printing: Xolography in Flow. *Advanced Materials*, 36(4). <https://doi.org/10.1002/adma.202306716>

Thijssen, Q., Toombs, J., Li, C. C., Taylor, H., & Van Vlierberghe, S. (2023, Aralık 1). From pixels to voxels: A mechanistic perspective on volumetric 3D-printing. *Progress in Polymer*

Science, C. 147. Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2023.101755>

van Nisselroy, C., Shen, C., Zambelli, T., & Momotenko, D. (2022). Electrochemical 3D printing of silver and nickel microstructures with FluidFM. *Additive Manufacturing*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102718>

Wei, W., Pingmei, M., Xinmin, Z., Xinchao, L., Yunyan, Z., Shen, N., & Sansan, A. (2022). Additive manufacturing of three-dimensional intricate microfeatures by electrolyte-column localized electrochemical deposition. *Additive Manufacturing*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102582>

Whyte, D. J., Doeven, E. H., Sutti, A., Kouzani, A. Z., & Adams, S. D. (2024, Mart 25). Volumetric additive manufacturing: A new frontier in layer-less 3D printing. *Additive Manufacturing*, C. 84. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104094>

Yang, Y., Jiang, R., Han, C., Chen, J., Li, H., Wang, Y., ... Wang, D. (2024, Aralık 1). Frontiers in Laser Additive Manufacturing Technology. *Additive Manufacturing Frontiers*, C. 3. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.amf.2024.200160>

Yourdkhani, M., Masoumipour, A., Ziaee, M., Dashtizad, S., & Dojan, C. F. (2025). Non-contact photothermal initiation of frontal polymerization during 3D printing of polymer composites. *npj Advanced Manufacturing*, 2(1), 48. <https://doi.org/10.1038/s44334-025-00062-9>

Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., ... Bernat, J. (2024, Mayıs 1). Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors*, C. 24. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/s24092668>

BÖLÜM 4

TERMOPLASTİK ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ KOMPOZİT KİRİŞ VE PANELLERİN MEKANİK KARAKTERİZASYONU

UĞUR ÖZMEN¹
KEMAL AYAN²

Giriş

Sandviç kompozit malzemeler, hafiflik ile yüksek mekanik performans gereksinimlerinin eş zamanlı olarak sağlanmasının zorunlu olduğu modern mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan çok katmanlı yapılar arasında yer almaktadır. İki ince ve rijit kabuk tabakası ile bu kabuklara kıyasla daha kalın ve düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemeden oluşan bu yapılar, özellikle ağırlık azaltımının kritik olduğu sistemlerde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar; yakıt verimliliğinin artırılması, taşıma kapasitesinin yükseltilmesi ve yapısal dayanımının iyileştirilmesi gibi performans kriterleri açısından sandviç kompozitleri vazgeçilmez hâle getirmektedir.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-1928-8003

² Doktora Öğrencisi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-2181-1350

Sandviç kompozitlerin mekanik davranışı; kabuk ve çekirdek malzemelerinin mekanik özelliklerine, geometrik tasarımlarına ve üretim yöntemlerine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Kabuk malzemeleri genellikle yük taşıma kapasitesini belirlerken, çekirdek malzemeleri yapının eğilme rijitliği, burkulma direnci ve enerji sönümleme kabiliyeti üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle sandviç yapıların tasarımında çekirdek malzeme seçimi ve çekirdek geometrisi, yapısal performans açısından kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Özellikle darbe yüklerine maruz kalan uygulamalarda, sandviç kompozitlerin hasar toleransı ve enerji emme kapasitesi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, çekirdek malzemelerin süneklik, tokluk ve şekil değiştirme kabiliyeti gibi özellikleri, sandviç yapıların darbe davranışını doğrudan etkilemektedir. Literatürde bu tür yapıların darbe performanslarının deneysel ve sayısal olarak incelendiği çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, yeni nesil malzemelerin ve yenilikçi çekirdek mimarilerinin sandviç kompozitlerde kullanımı hâlen araştırmaya açık bir alan olarak varlığını sürdürmektedir.

Sandviç Kompozit Yapılar ve Sınıflandırılması

İki ince, rijit kabuk tabakası ile bu kabuklara kıyasla daha kalın, hafif ve düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemeden oluşan sandviç kompozit yapılar; yüksek özgül eğilme rijitliği (rijitlik/ağırlık oranı) ve yüksek özgül mukavemet (mukavemet/ağırlık oranı) değerleri sayesinde son yıllarda başta havacılık, denizcilik ve savunma sanayii olmak üzere birçok ileri mühendislik uygulamasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yapıların temel avantajı, minimum ağırlık artışı ile maksimum mekanik performans sağlanabilmesi olup, özellikle yakıt verimliliği, taşıma kapasitesi ve yapısal dayanımın kritik olduğu uygulamalarda önemli bir tasarım avantajı sunmaktadır.

Sandviç kompozit yapılarda kullanılan kabuk ve çekirdek malzemeleri, mekanik performans üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Kabuk malzemesi olarak alüminyum, çelik ve tabakalı kompozitler yaygın şekilde kullanılırken (Zhao, Yang, Chen ve Guan, 2022) , çekirdek malzemeleri genellikle düşük yoğunluklu ve enerji sönümleme kapasitesi yüksek yapılar arasından seçilmektedir. Bu kapsamda sandviç kompozitler; köpük çekirdekli sandviç yapılar (Fam ve Sharaf, 2010; Hassanpour Roudbeneh, Liaghat, Sabouri ve Hadavinia, 2020; Russo ve Zuccarello, 2007; Sharaf ve Fam, 2013), bal peteği çekirdekli sandviç yapılar (Crupi, Epasto ve Guglielmino, 2013; Han vd., 2020; Jen ve Chang, 2009; Nasution, Watanabe ve Kondo, 2015; Sturm, Klett, Kindervater ve Voggenreiter, 2014; Z. Zhang vd., 2020), oluklu çekirdekli sandviç yapılar (Côté, Deshpande, Fleck ve Evans, 2006; Magnucka-Blandzi, Magnucki ve Wittenbeck, 2015; Meng, Lan, Zhao ve Wang, 2020; Seong, Jung, Yang, Moon ve Ahn, 2010; Vaidya vd., 2015; J. Zhang, Supernak, Mueller-Alander ve Wang, 2013) ve kafes (lattice) çekirdekli sandviç yapılar (Cote, Biagi, Bart-Smith ve Deshpande, 2007; Lim ve Kang, 2006; Shi, Dileep, Heidenreich ve Koch, 2018; Sugimura, 2004; L. Wang, Saito, Gotou ve Okabe, 2019; Zhou, Shrotriya ve Soboyejo, 2004) olarak sınıflandırılabilir. Bu farklı çekirdek mimarileri, sandviç yapıların eğilme, burkulma, darbe ve enerji yutma performanslarını doğrudan etkilemektedir.

Sandviç Kompozitlerde Darbe Davranışı Üzerine Yapılan Çalışmalar

Sandviç kompozitlerin çekirdek kısımlarında özellikle sünek karaktere sahip malzemelerin kullanımı, darbe dayanımı açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Sünek malzemeler, yüksek şekil değiştirme kabiliyetleri ve buna bağlı yüksek tokluk değerleri sayesinde darbe yükleri altında enerjiyi daha etkin bir şekilde sönümleyerek yapısal hasarı sınırlandırabilmektedir (Karsandik, Sabuncuoglu, Yildirim ve Silberschmidt, 2023). Bu nedenle, sandviç

kompozit yapıların darbe davranışlarının incelendiği çalışmalar literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Son yıllarda kompozit ve sandviç yapıların darbe performansını inceleyen çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma yapılmış olup, bu çalışmalar Tablo 1’de özetlenmiştir.

Usta, Türkmen ve Scarpa (2021), özkatik (negatif Poisson oranına sahip) ve özkatik olmayan çekirdek geometrilerine sahip, karbon fiber takviyeli epoksi kompozit (KFDP) kabuk malzemesi kullanılan sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarını incelemiştir. Çekirdek malzeme olarak üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş polilaktik asit (PLA) kullanılmış ve farklı çekirdek geometrilerinin darbe performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Xie, Jing, Zhou ve Liu (2020), alüminyum kabuk ve köpük bal peteği çekirdek yapıya sahip sandviç kompozitlerde çekirdek yoğunluğunun darbe direncine etkisini araştırmış ve yoğunluktaki artışın darbe dayanımında sınırlı bir iyileşme sağladığını rapor etmiştir. Xue, Zhang, Chen, Wu ve Zhao (2019) ise çekirdek kalınlığının darbe davranışı üzerindeki etkisini incelemiş ve çekirdek kalınlığının maksimum darbe kuvveti ve emilen enerji üzerinde belirgin bir etkisinin bulunmadığını ortaya koymuştur. H. Wang, Ramakrishnan ve Shankar (2016), alüminyum kabuklu sandviç yapılarda balsa ağacı ve polipropilen bal peteği gibi farklı çekirdek malzemelerinin orta hızlı darbe davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Yang vd. (2015) ve Ugale, Singh, Mishra ve Kumar (2015) ise karbon fiber ve cam fiber takviyeli kabuk malzemelerinin darbe performansı üzerindeki etkilerini farklı enerji seviyeleri için analiz etmişlerdir. Crupi, Epasto ve Guglielmino (2012) alüminyum kabuk ve alüminyum bal peteği çekirdeğe sahip sandviç yapılarda hücre boyutlarının darbe davranışı üzerindeki rolünü detaylı olarak incelemiştir.

Tablo 1. Darbe Özelliklerinin İncelendiği Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler (Karsandik vd., 2023)

Kaynak	Kabuk Malzemesi	Çekirdek Malzemesi
(Y. Zhu ve Sun, 2021)	KFDP	PLA bal peteği
(Usta, Türkmen ve Scarpa, 2021)	KFDP	PU Köpük
(Xie, Jing, Zhou ve Liu, 2020)	Alüminyum	Nomex bal peteği
(Xue, Zhang, Chen, Wu ve Zhao, 2019)	CFDP - KFDP	Nomex bal peteği
(He vd., 2019)	KFDP	Alüminyum bal peteği
(Bai vd., 2019)	KFDP	PMI Köpük
(Aryal vd., 2019)	KFDP	Nomex bal peteği
(D. Zhang, Fei ve Zhang, 2017)	Alüminyum	Alüminyum bal peteği
(Chen, Hou, Fu, Han ve Ye, 2017)	KFDP	Nomex bal peteği
(T. Zhang, Yan, Li ve Luo, 2016)	KFDP	Nomex bal peteği
(H. Wang, Ramakrishnan ve Shankar, 2016)	Alüminyum	Balsa ahşap/PP bal peteği/Köpük
(Yang vd., 2015)	CFDP - KFDP	PU Köpük

Kaynak	Kabuk Malzemesi	Çekirdek Malzemesi
(J. Wang, Chen, Wang ve Waas, 2015)	KFDP	Köpük
(Ugale, Singh, Mishra ve Kumar, 2015)	CFDP - KFDP	Köpük
(Ivañez, Moure, Garcia-Castillo ve Sanchez-Saez, 2015)	KFDP	Nomex bal peteği
(Akatay, Bora, Çoban, Fidan ve Tuna, 2015)	Alüminyum	Alüminyum bal peteği
(McQuigg, Kapania, Scotti ve Walker, 2014)	CFDP	Nomex bal peteği
(Gordon, Boukhili ve Merah, 2014)	CFDP	Köpük
(Gilioli, Sbarufatti, Manes ve Giglio, 2014)	Alüminyum	Nomex bal peteği
(G. Zhang vd., 2013)	KFDP	Alüminyum piramid kafes
(Feng ve Aymerich, 2013)	KFDP	Köpük
(Crupi, Epasto ve Guglielmino, 2012)	Alüminyum	Alüminyum bal peteği
(Cho, Choi, Lee, Cho ve Han, 2013)	Alüminyum	Alüminyum bal peteği
(Tan ve Akil, 2012)	Alüminyum - CFDP	PP bal peteği

Kaynak	Kabuk Malzemesi	Çekirdek Malzemesi
(Ma, Yan, Liu ve Yang, 2012)	CFDP	Köpük
(Klaus, Reimerdes ve Gupta, 2012)	KFDP	Nomex bal peteği
(Zinno, Prota, Di Maio ve Bakis, 2011)	CFDP	Nomex bal peteği
(S. Zhu ve Chai, 2011)	Akrilik	Nomex bal peteği
(Sawal ve Hazizan, 2011)	Alüminyum	PP bal peteği

KFDP: Karbon fiber destekli polimer, CFDP: Cam fiber destekli polimer, PP: Polipropilen

Termoplastik Çekirdek Malzemeler ve PVA'nın Literatürdeki Yeri

Termoplastik polimerler; düşük yoğunluk, yüksek darbe direnci, iyi şekillendirilebilirlik, üretim kolaylığı ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajları sayesinde hem tek başına hem de takviyeli olarak sandviç kompozit yapılarda yaygın biçimde kullanılmaktadır (Grünwald, Parlevliet ve Altstädt, 2017). Polipropilen (PP), poliamid (PA), polieterimid (PEI) ve polietereterketon (PEEK) gibi termoplastik malzemeler, kabuk malzemesi olarak kullanıldıkları gibi çekirdek malzemesi olarak da tercih edilmektedir. Bu çalışmanın odak noktası olan termoplastik çekirdek malzemelere ilişkin güncel çalışmalar Tablo 2'de sunulmuştur.

PP, düşük üretim maliyeti (Grünwald vd., 2017), kolay temin edilebilirliği ve hem kabuk hem de çekirdek olarak kullanıldığında geri dönüştürülebilir olması (Cabrera, Alcock ve

Peijs, 2008) nedeniyle öne çıkmaktadır. PMI köpükler, eriyebilir olmamalarına rağmen yaklaşık 180°C'ye kadar olan yüksek termal dayanımları sebebiyle tercih edilmektedir (Åkermo ve Åström, 1998; Breuer, Ostgathe ve Neitzel, 1998; McGarva ve Åström, 1999). PEI ise yüksek operasyon sıcaklığına ek olarak üstün ateş, duman ve toksisite (FST) özellikleri sayesinde havacılık uygulamalarında sandviç yapıların çekirdek kısımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 2. Çekirdek Malzemesi olarak polimerlerin kullanıldığı çalışmalar (Grünwald vd., 2017)

Kaynak	Polimer	Yapı
(Cabrera vd., 2008; Passaro, Corvaglia, Manni, Barone ve Maffezzoli, 2004)	PP	Bal peteği
(Cabrera vd., 2008)	PP	Köpük
(Skawinski, Binetruy, Krawczak, Grando ve Bonneau, 2004)	PP	Köpük
(Passaro, Corvaglia, Manni, Barone ve Maffezzoli, 2004)	PP	Köpük
(Åkermo ve Åström, 1999)	PP	Köpük
(Pappadà, Rametta, Passaro, Lanzilotto ve Maffezzoli, 2010)	PET	Köpük
(Breuer vd., 1998)	PA12	Bal peteği
(Åkermo ve Åström, 1998; Breuer vd., 1998; McGarva ve Åström, 1999; Trende ve Åström, 2002)	PMI	—

Kaynak	Polimer	Yapı
(Offringa ve Davies, 1996)	Aramid/Fenolik	Bal peteği
(Rozant, Bourban ve Månson, 2000, 2001, t.y.)	PEI	Köpük

*PP: Polipropilen, PET: Polietilentereftalat, PA12: Poliamid 12, PES: Polietersülfon, PEI: Polieterimid

Polivinil alkol (PVA), tamamen biyoindirgenebilir, toksik olmayan yapısı, yüksek mekanik ve termal özellikleri ile kompozit malzeme araştırmalarında son yıllarda dikkat çeken bir termoplastik polimerdir (Jain, Singh ve Chauhan, 2017). Ayrıca suda çözünabilir olması, PVA'yı reçine, medikal uygulamalar, yapı malzemeleri ve paketleme sektörleri için cazip kılmaktadır. Al-Taie vd. (2020), üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiş PVA numunelerin mekanik özelliklerini incelemiş ve UV ışınlarının mekanik performans üzerinde olumlu etkileri olduğunu göstermiştir. Musa ve Hameed (2020), nişasta/PVA kompozitlerinin mekanik davranışlarını araştırmış; nişasta katkısının çekme mukavemeti ve kopma uzamasını düşürdüğünü, elastisite modülünü ise artırdığını rapor etmiştir. Sun, Zhou, Wang, Shi ve Wang (2022) ise PVA lif katkılı betonların mekanik özelliklerini basma testleri ile inceleyerek dayanım artışlarını ortaya koymuştur.

Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada, sandviç kompozit malzemelerin mekanik davranışı, özellikle çekirdek malzeme seçimi ve çekirdek mimarisinin darbe performansı üzerindeki etkileri literatür ışığında kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. İncelenen çalışmalar, sandviç kompozit yapıların yüksek özgül eğilme rijitliği ve özgül mukavemet değerleri sayesinde başta havacılık, denizcilik ve

savunma sanayii olmak üzere birçok ileri mühendislik uygulamasında kritik bir rol üstlendiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, kabuk ve çekirdek malzemelerinin birlikte optimize edilmesinin, yapısal performansın artırılmasında temel bir gereklilik olduğu görülmektedir.

Literatürde yer alan deneysel ve sayısal çalışmalar incelendiğinde, sandviç kompozitlerin darbe davranışının büyük ölçüde çekirdek malzemenin mekanik özelliklerine ve geometrik yapısına bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle sünek karaktere sahip çekirdek malzemelerin, yüksek şekil değiştirme kabiliyetleri sayesinde darbe enerjisini daha etkin biçimde sönümleyerek hasar toleransını artırdığı rapor edilmiştir. Bununla birlikte, mevcut çalışmaların büyük bir bölümünde geleneksel köpükler, bal peteği yapılar veya metal esaslı çekirdeklerin tercih edildiği; yeni nesil, yüksek süneklik ve çevresel sürdürülebilirlik özelliklerine sahip polimerlerin ise sınırlı ölçüde ele alındığı görülmektedir.

Termoplastik polimerlerin sandviç kompozit çekirdeklerinde kullanımına yönelik çalışmalar, bu malzemelerin düşük yoğunluk, yüksek darbe direnci, üretim kolaylığı ve geri dönüştürülebilirlik gibi önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Ancak literatürde yer alan çalışmaların büyük kısmı polipropilen, poliamid, PET, PMI ve PEI gibi yaygın termoplastiklere odaklanmış olup, yüksek şekil değiştirme kabiliyetine sahip alternatif polimerlerin sandviç kompozit çekirdek malzemesi olarak kullanımına yönelik araştırmaların oldukça sınırlı olduğu dikkat çekmektedir.

Bu bağlamda, tamamen biyoyindirgenebilir, toksik olmayan yapısı ve yüksek kopma uzaması ile öne çıkan polivinil alkolün (PVA), sandviç kompozit yapılarda çekirdek malzeme olarak kullanım potansiyelinin henüz yeterince ortaya konmadığı görülmektedir. Literatürde PVA'nın farklı mühendislik uygulamalarındaki mekanik davranışı incelenmiş olmasına rağmen, sandviç kompozit sistemlerde darbe, eğilme ve dinamik mekanik

davranış üzerindeki etkilerine ilişkin kapsamlı bir çalışmanın bulunmaması, önemli bir araştırma boşluğuna işaret etmektedir.

Kaynakça

Akatay, A., Bora, M. Ö., Çoban, O., Fidan, S., ve Tuna, V. (2015). The influence of low velocity repeated impacts on residual compressive properties of honeycomb sandwich structures. *Composite Structures*, 125, 425-433.

Akermo, M., ve Astrom, B. T. (1999). Experimental investigation of compression molding of glass/PP-PP foam core sandwich components. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 12(4), 297-316.

Åkermo, M., ve Åström, B. T. (1998). Modelling face-core bonding in sandwich manufacturing: Thermoplastic faces and rigid closed-cell foam core. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(5-6), 485-494.

Al-Taie, A., Pan, J., Polak, P., Barer, M. R., Han, X., ve Abbott, A. P. (2020). Mechanical properties of 3-D printed polyvinyl alcohol matrix for detection of respiratory pathogens. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 112, 104034.

Aryal, B., Morozov, E. V., Wang, H., Shankar, K., Hazell, P. J., ve Escobedo-Diaz, J. P. (2019). Effects of impact energy, velocity, and impactor mass on the damage induced in composite laminates and sandwich panels. *Composite Structures*, 226, 111284.

Bai, R., Guo, J., Lei, Z., Liu, D., Ma, Y., ve Yan, C. (2019). Compression after impact behavior of composite foam-core sandwich panels. *Composite Structures*, 225, 111181.

Breuer, U., Ostgathe, M., ve Neitzel, M. (1998). Manufacturing of all-thermoplastic sandwich systems by a one-step forming technique. *Polymer Composites*, 19(3), 275-279.

Cabrera, N. O., Alcock, B., ve Peijs, T. (2008). Design and manufacture of all-PP sandwich panels based on co-extruded polypropylene tapes. *Composites Part B: Engineering*, 39(7-8), 1183-1195.

Chen, Y., Hou, S., Fu, K., Han, X., ve Ye, L. (2017). Low-velocity impact response of composite sandwich structures: Modelling and experiment. *Composite Structures*, 168, 322-334.

Cho, J. U., Choi, H. K., Lee, S., Cho, C., ve Han, M. S. (2013). Experimental study of the impact characteristics of sandwich composites with aluminum honeycomb cores. *International Journal of Automotive Technology*, 14(3), 415-421.

Cote, F., Biagi, R., Bart-Smith, H., ve Deshpande, V. S. (2007). Structural response of pyramidal core sandwich columns. *International Journal of Solids and Structures*, 44(10), 3533-3556.

Côté, F., Deshpande, V. S., Fleck, N. A., ve Evans, A. G. (2006). The compressive and shear responses of corrugated and diamond lattice materials. *International Journal of Solids and Structures*, 43(20), 6220-6242.

Crupi, V., Epasto, G., ve Guglielmino, E. (2012). Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 43, 6-15.

Crupi, V., Epasto, G., ve Guglielmino, E. (2013). Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam. *Marine Structures*, 30, 74-96.

Fam, A., ve Sharaf, T. (2010). Flexural performance of sandwich panels comprising polyurethane core and GFRP skins and ribs of various configurations. *Composite Structures*, 92(12), 2927-2935.

Feng, D., ve Aymerich, F. (2013). Damage prediction in composite sandwich panels subjected to low-velocity impact. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 52, 12-22.

Gilioli, A., Sbarufatti, C., Manes, A., ve Giglio, M. (2014). Compression after impact test (CAI) on NOMEXTM honeycomb sandwich panels with thin aluminum skins. *Composites Part B: Engineering*, 67, 313-325.

Gordon, S., Boukhili, R., ve Merah, N. (2014). Impact behavior and finite element prediction of the compression after impact strength of foam/vinylester-glass composite sandwiches. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 16(5), 551-574.

Grünewald, J., Parlevliet, P., ve Altstädt, V. (2017). Manufacturing of thermoplastic composite sandwich structures: A review of literature. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 30(4), 437-464.

Han, Q., Qin, H., Liu, Z., Han, Z., Zhang, J., Niu, S., ... Shi, S. (2020). Experimental investigation on impact and bending properties of a novel dactyl-inspired sandwich honeycomb with carbon fiber. *Construction and Building Materials*, 253, 119161.

Hassanpour Roudbeneh, F., Liaghat, G., Sabouri, H., ve Hadavinia, H. (2020). High-velocity impact loading in honeycomb sandwich panels reinforced with polymer foam: A numerical approach study. *Iranian Polymer Journal*, 29(8), 707-721.

He, W., Yao, L., Meng, X., Sun, G., Xie, D., ve Liu, J. (2019). Effect of structural parameters on low-velocity impact behavior of aluminum honeycomb sandwich structures with CFRP face sheets. *Thin-Walled Structures*, 137, 411-432.

Ivañez, I., Moure, M. M., Garcia-Castillo, S. K., ve Sanchez-Saez, S. (2015). The oblique impact response of composite sandwich plates. *Composite Structures*, 133, 1127-1136.

Jain, N., Singh, V. K., ve Chauhan, S. (2017). A review on mechanical and water absorption properties of polyvinyl alcohol based composites/films. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 26(5-6), 213-222.

Jen, Y.-M., ve Chang, L.-Y. (2009). Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams. *Engineering Failure Analysis*, 16(4), 1282-1293.

Karsandik, Y., Sabuncuoglu, B., Yildirim, B., ve Silberschmidt, V. V. (2023). Impact behavior of sandwich composites for aviation applications: A review. *Composite Structures*, 321, 117237.

Klaus, M., Reimerdes, H.-G., ve Gupta, N. K. (2012). Experimental and numerical investigations of residual strength after impact of sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*, 44, 50-58.

Lim, J.-H., ve Kang, K.-J. (2006). Mechanical behavior of sandwich panels with tetrahedral and Kagome truss cores fabricated from wires. *International Journal of Solids and Structures*, 43(17), 5228-5246.

Ma, J., Yan, Y., Liu, Y. J., ve Yang, L. (2012). Compression strength of stitched foam-core sandwich composites with impact induced damage. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(18), 1236-1246.

Magnucka-Blandzi, E., Magnucki, K., ve Wittenbeck, L. (2015). Mathematical modeling of shearing effect for sandwich beams with sinusoidal corrugated cores. *Applied Mathematical Modelling*, 39(9), 2796-2808.

McGarva, L. D., ve Åström, B. T. (1999). Experimental investigation of compression moulding of glass/PA12-PMI foam core sandwich components. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30(10), 1171-1185.

McQuigg, T. D., Kapania, R. K., Scotti, S. J., ve Walker, S. P. (2014). Compression after impact experiments on thin face sheet honeycomb core sandwich panels. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 51(1), 253-266.

Meng, L., Lan, X., Zhao, J., ve Wang, Z. (2020). Equivalent models and mechanical properties of bio-inspired corrugated sandwich structures subjected to bending loads. *Composite Structures*, 244, 112257.

Musa, B. H., ve Hameed, N. J. (2020). Study of the mechanical properties of polyvinyl alcohol/starch blends. *Materials Today: Proceedings*, 20, 439-442.

Nasution, M. R. E., Watanabe, N., ve Kondo, A. (2015). Numerical study on thermal buckling of CFRP–Al honeycomb sandwich composites based on homogenization–localization analysis. *Composite Structures*, 132, 709-719.

Offringa, A., ve Davies, C. R. (1996). Gulfstream V floors: Primary aircraft structure in advanced thermoplastics. *Journal of Advanced Materials*, 27(2), 2-10.

Pappadà, S., Rametta, R., Passaro, A., Lanzilotto, L., ve Maffezzoli, A. (2010). Processing, mechanical properties, and interfacial bonding of a thermoplastic core-foam/composite-skin sandwich panel. *Advances in Polymer Technology*, 29(3), 137-145.

Passaro, A., Corvaglia, P., Manni, O., Barone, L., ve Maffezzoli, A. (2004). Processing-properties relationship of sandwich panels with polypropylene-core and polypropylene-matrix composite skins. *Polymer Composites*, 25(3), 307-318.

Rozant, O., Bourban, P.-E., ve Månson, J.-A. E. (2001). Manufacturing of three dimensional sandwich parts by direct thermoforming. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(11), 1593-1601.

Rozant, O., Bourban, P.-E., ve Månson, J.-A. E. (t.y.). Experimental and numerical investigations of the forming of thermoplastic sandwiches.

Rozant, O., Bourban, P.-E., Manson, J.-A. E., ve Drezet, J.-M. (2000). Pre-heating of thermoplastic sandwich materials for rapid thermoforming. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 13(6), 510-523.

Russo, A., ve Zuccarello, B. (2007). Experimental and numerical evaluation of the mechanical behaviour of GFRP sandwich panels. *Composite Structures*, 81(4), 575-586.

Sawal, N., ve Hazizan, M. A. (2011). Effect of core thicknesses on impact performance of thermoplastic honeycomb core sandwich structure under low-velocity impact loading. *Key Engineering Materials*, 471-472, 461-465.

Seong, D. Y., Jung, C. G., Yang, D. Y., Moon, K. J., ve Ahn, D. G. (2010). Quasi-isotropic bending responses of metallic sandwich plates with bi-directionally corrugated cores. *Materials & Design*, 31(6), 2804-2812.

Sharaf, T., ve Fam, A. (2013). Analysis of large scale cladding sandwich panels composed of GFRP skins and ribs and polyurethane foam core. *Thin-Walled Structures*, 71, 91-101.

Shi, Y., Dileep, P. K., Heidenreich, B., ve Koch, D. (2018). Determination and modeling of bending properties for continuous fiber reinforced C/C-SiC sandwich structure with grid core. *Composite Structures*, 204, 198-206.

Skawinski, O., Binetruy, C., Krawczak, P., Grando, J., ve Bonneau, E. (2004). All-thermoplastic composite sandwich panels – Part I: Manufacturing and improvement of surface quality. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 6(5), 399-421.

Sturm, R., Klett, Y., Kindervater, Ch., ve Voggenreiter, H. (2014). Failure of CFRP airframe sandwich panels under crash-relevant loading conditions. *Composite Structures*, 112, 11-21.

Sugimura, Y. (2004). Mechanical response of single-layer tetrahedral trusses under shear loading. *Mechanics of Materials*, 36(8), 715-721.

Sun, X., Zhou, J., Wang, Q., Shi, J., ve Wang, H. (2022). PVA fibre reinforced high-strength cementitious composite for 3D printing: Mechanical properties and durability. *Additive Manufacturing*, 49, 102521.

Tan, C. Y., ve Akil, H. Md. (2012). Impact response of fiber metal laminate sandwich composite structure with polypropylene honeycomb core. *Composites Part B: Engineering*, 43(3), 1433-1438.

Trende, A., ve Astrom, B. T. (2002). Heat transfer in compression molding of thermoplastic composite laminates and sandwich panels. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 15(1), 43-63.

Ugale, V., Singh, K., Mishra, N., ve Kumar, P. (2015). Comparative study of carbon fabric reinforced and glass fabric reinforced thin sandwich panels under impact and static loading. *Journal of Composite Materials*, 49(1), 99-112.

Usta, F., Türkmen, H. S., ve Scarpa, F. (2021). Low-velocity impact resistance of composite sandwich panels with various types of auxetic and non-auxetic core structures. *Thin-Walled Structures*, 163, 107738.

Vaidya, S., Zhang, L., Maddala, D., Hebert, R., Wright, J. T., Shukla, A., ve Kim, J.-H. (2015). Quasi-static response of sandwich steel beams with corrugated cores. *Engineering Structures*, 97, 80-89.

Wang, H., Ramakrishnan, K. R., ve Shankar, K. (2016). Experimental study of the medium velocity impact response of

sandwich panels with different cores. *Materials & Design*, 99, 68-82.

Wang, J., Chen, B., Wang, H., ve Waas, A. M. (2015). Experimental study on the compression-after-impact behavior of foam-core sandwich panels. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 17(4), 446-465.

Wang, L., Saito, K., Gotou, Y., ve Okabe, Y. (2019). Design and fabrication of aluminum honeycomb structures based on origami technology. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 21(4), 1224-1242.

Xie, S., Jing, K., Zhou, H., ve Liu, X. (2020). Mechanical properties of Nomex honeycomb sandwich panels under dynamic impact. *Composite Structures*, 235, 111814.

Xue, X., Zhang, C., Chen, W., Wu, M., ve Zhao, J. (2019). Study on the impact resistance of honeycomb sandwich structures under low-velocity/heavy mass. *Composite Structures*, 226, 111223.

Yang, B., Wang, Z., Zhou, L., Zhang, J., Tong, L., ve Liang, W. (2015). Study on the low-velocity impact response and CAI behavior of foam-filled sandwich panels with hybrid facesheet. *Composite Structures*, 132, 1129-1140.

Zhang, D., Fei, Q., ve Zhang, P. (2017). Drop-weight impact behavior of honeycomb sandwich panels under a spherical impactor. *Composite Structures*, 168, 633-645.

Zhang, G., Wang, B., Ma, L., Xiong, J., Yang, J., ve Wu, L. (2013). The residual compressive strength of impact-damaged sandwich structures with pyramidal truss cores. *Composite Structures*, 105, 188-198.

Zhang, J., Supernak, P., Mueller-Alander, S., ve Wang, C. H. (2013). Improving the bending strength and energy absorption of corrugated sandwich composite structure. *Materials & Design*, 52, 767-773.

Zhang, T., Yan, Y., Li, J., ve Luo, H. (2016). Low-velocity impact of honeycomb sandwich composite plates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(1), 8-32.

Zhang, Z., Zhang, Q., Zhang, D., Li, Y., Jin, F., ve Fang, D. (2020). Enhanced mechanical performance of brazed sandwich panels with high density square honeycomb-corrugation hybrid cores. *Thin-Walled Structures*, 151, 106757.

Zhao, T., Yang, J., Chen, J., ve Guan, S. (2022). Review of carbon fiber-reinforced sandwich structures. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 1-15.

Zhou, J., Shrotriya, P., ve Soboyejo, W. O. (2004). On the deformation of aluminum lattice block structures: From struts to structures. *Mechanics of Materials*, 36(8), 723-737.

Zhu, S., ve Chai, G. B. (2011). Effect of adhesive in sandwich panels subjected to low-velocity impact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 225(3), 171-181.

Zhu, Y., ve Sun, Y. (2021). Low-velocity impact response of multilayer foam core sandwich panels with composite face sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*, 209, 106704.

Zinno, A., Prota, A., Di Maio, E., ve Bakis, C. E. (2011). Experimental characterization of phenolic-impregnated honeycomb sandwich structures for transportation vehicles. *Composite Structures*, 93(11), 2910-2924.

BÖLÜM 5

POLİVİNİL ALKOL (PVA): TARİHSEL GELİŞİM, YAPISAL ÖZELLİKLER VE MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI

UĞUR ÖZMEN¹
KEMAL AYAN²

Giriş

1912 yılında polivinil asetat ilk kez elde edildi. Yaratıcısı Alman bilim adamı Fritz Klatt'tı. Birkaç yıl sonra bilim insanının gelişimi yaygınlaştı ve ticari amaçlı üretilmeye başlandı. 1912 yılında Dr. Fritz Klatt, asetilen gazından vinil asetat elde edilerek elde edildiğini keşfetti. Bu gaz kolayca polimerleşerek bir katı oluşumuna neden oldu. Vinil asetat, 1912'de patenti alındıktan sonra en yaygın şekilde kullanıldı. Daha sonra girişimci Farben, polivinil asetatın (PVA) üretimini büyük bir ticari ölçekte organize etti. Daha sonra Farben yalnızca film oluşturan yapıştırıcılarla çalıştı. Bu yapıştırıcının ilk üretimi 1937 yılında ABD'de Monsanto'da yapıldı. Daha sonra araba camlarını korumak için PVA tutkalı kullanıldı. İki yıl sonra, Profesör Ichiro Sakurada'nın öğrencisi Koreli bilim adamı

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-1928-8003

² Doktora Öğrencisi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-2181-1350

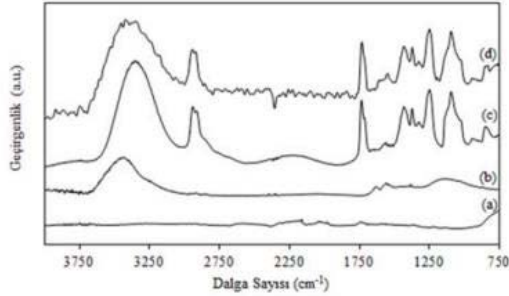
Lee Seung-gi, Japon meslektaşları Kawakami ve Masahide ile birlikte suda çözünen bir lif keşfetti. Lif vinalon olarak adlandırıldı ve polivinil alkole dayanıyordu. 1941'de Lee Seung Gi, daha sonra PVA yapıştırıcısının ana bileşeni olacak yeni bir malzemenin keşfi için patent aldı.

Polivinil Alkolün Tarihsel Gelişimi ve Endüstriyel Ortaya Çıkışı

1983 tarihli GOST 18992-80, "Süper PVA D3 tutkal momenti" adı verilen modern bir ürünün aynı nitelikleriyle birebir örtüşen plastikleştirilmiş bir PVA dispersiyonunun gereksinimlerini ve özelliklerini tanımladı. Ancak Sovyet terminolojisinde işaretleme farklıydı - DF51 / 15V. Kod çözüldükten sonra aktif maddenin hacim oranı %51 olan yüksek viskoziteli bir PVA dispersiyonu olduğu anlaşılmaktadır. Plastikleştirici olarak %15 dibütil ftalat eklenir (Gautam ve ark., 2021).

Mühendislik Mimarlık Fakültesi dergisinde titanyum dioksit (TiO_2) ve karbon nanotüp (CNT) nanopartikülleri içeren polivinil alkol (PVA) nanolifler, elektroegirme yöntemi ile hazırlanmıştır. Titanyum dioksit nanopartikülleri, titanyum izopropoksit'in ($\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$) hidroliz ve kondenzasyon tepkimesi ile sol-jel yöntemi kullanılarak sentezlenmiştir. Çıkması istenen değerlerin tam zıttı olarak PVA çözeltisine TiO_2 ve CNT takviyesi ile sonuç olarak nanoliflerin çapında biraz incelme gözlenmiştir. İletken dolgu maddesi karbon nanotüpün, fiber çapında görülen incelmeye sebep olduğu düşünülmüştür. Karbon nanotüpe benzeyen iletken dolgu ürünleri, elektro egirme işleminde nanolif elde etmek için hazırlanmış olan çözeltinin iletkenliğini arttırarak olumlu sonuç verebilir. Polimer çözeltisinin iletkenliğindeki bu artış, uzama eğilimindeki çözeltinin direnişini düşürerek elde edilmiş olan fiber çapının incelmesine neden olmaktadır. Şekil 1'de TiO_2 /CNT/PVA nanoliflere ait FTIR spektrumu sunulmaktadır. PVA nanolifler ve kompozit nanoliflere ait spektrumlar büyük derece benzemektedir.

PVA'ya ait karakteristik emilme durumu pikleri kompozit nanoliflerde aynı dalga boylarında olduğu görülmektedir. PVA nanoliflerinde gözlenen boncuk yapıları, kompozit nanoliflerde bulunamamıştır. Ayrıca, daha düzgün fiber yapıları elde edilmiştir (Gautam ve ark., 2021).



Şekil 1.1. 550°C'de kalsinasyon işlemi uygulanmış TiO₂'ye b) CNT'ye c) PVA nanoliflere d) TiO₂/CNT/PVA nanoliflere ait FTIR spektrumları (Gautam ve ark., 2021)

Turkish Journal of Forest Science dergisinde de yonga levha üzerinde yapılan su alma ve kalınlığına şişme değerleri daha düzgün hale getirebilmek için test örneklerinin, içinde önceden belirlenmiş değerlerde lignin hasarcısı olarak geçen Lentinus edodes mantarı sebebiyle bozulan kayın lifleri eklenmiş olan PVA ve PÜ tutkallarının karışımı sonucu elde edilen su alma ve kalınlığa göre şişme verileri elde edilmiştir. İlave maddesi olarak, PVA (Polivinil asetat) ve PÜ (Poliüretan) tutkalları içerisine %2.5, %5 ve %7.5 oranlarında tahrip edilmiş lifler koyularak levhanın, su alma ve kalınlığı parametrelerince şişme oranları değerlendirilmiştir. 2,5 oranında eklenen çözünmüş lif, belirli bir miktarda PVA ile çapraz bağ oluşturarak karışıma katkıda bulunmuştur. Bu kapsamda PVA'ya katılmış ürünlerin bağ yapabilme niteliği değişik çalışmalarda (Mathew ve ark., 2011; Geng ve ark., 2017) ortaya konmuştur. Lif oranının çoğalması ile açık uçlu OH gruplarının yükselmesine sebep olmakta ve bunun da PVA'ya bağlanamamış grupların yapılarına

fazlaca su girmesi sonucunu olduğu düşünölmektedir. Yonga levhalarında PVA tutkalının, PÜ tutkalına kıyasla su emme ve kalınlık artışı üzerinde olumlu bir etkisi olduğu, ek olarak bozunmuş kayın liflerinin eklenmesinin özellikle uzun süre su ile muamele edildiğinde bu etkinin daha da arttığı ifade edilebilir. Bunun yanı sıra, PVA ve PÜ tutkalı uygulanan malzemenin daha uzun süre suda bekletilmesi ve doygun hale getirilmesi sırasında, liflerin birlikte kullanıldıkları takdirde tutkalla daha fazla oranda bağ yapması beklenebilir. Bu gözlemler doğrultusunda, yonga levhaların açık hava koşullarında ve nemli ortamlarda birbirine yapıştırılarak kullanılması durumunda, bozunmuş kayın lifleri eklenmiş PVA tutkalının tercih edilmesi önerilebilir. Mobilya imalat sanayinin temel hammaddelerinden olan yonga levhaların fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla söz konusu sanayi kolunda yaygın olarak kullanılan PVA ve PÜ tutkallarına lignin bozdurucu özelliğine sahip olan *Lentinus edodes* mantarı tarafından bozulan kayın lifleri ilave edilerek su alma ve kalınlığına şişme değerlerine etkisi çalışılmıştır (Briscoe, Luckham ve Zhu, 2000).

Özdemir (2019) yüksek lisans çalışmasında, sanayide önemli olan polivinil alkol (PVA) polimeri ile bor minerali (BM) partiküllerinin özellikleri üzerine detaylı araştırmalar yapmıştır. Bu araştırma, daha kaliteli kompozit malzemeler elde etmek amacıyla BM partiküllerinin ufulanması için ultrasonik parçalayıcı kullanılmasını içermiştir. Ardından, poli(vinil alkol)/bor minerali (PVA/BM) kompozitleri ex-situ çözelti karışımı yöntemiyle hazırlanmış ve UV-Vis ve FT-IR spektroskopik yöntemlerle karakterize edilmiştir. Bu malzemelerden elde edilen saf PVA ve PVA/BM kompozitlerinin, optik veya çeşitli endüstrilerde kullanım potansiyeli için filmleri damlatma yöntemiyle üretilmiştir. Bu filmlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. PVA ile BM arasındaki etkileşimler, çeşitli spektroskopik ve mikroskopik yöntemler kullanılarak araştırılmıştır. UV-Vis ve FT-IR sonuçları hem BM

partiküllerinin yapısında hem de PVA polimer ana zincirlerindeki hidroksil grupları arasında güçlü etkileşimler olduğunu göstermiştir. BM partiküllerinin ve filmlerin morfolojileri SEM cihazı ile incelenmiş ve analizler, BM partiküllerinin kompozit film içinde homojen bir şekilde dağıldığını ancak bazı bölgelerde topaklanma olduğunu göstermiştir. BM partiküllerinin PVA film matriksi içindeki varlığı ve dağılımları EDX ile analiz edilmiştir. Ayrıca, PVA ve PVA/BM kompozitlerinin kütle kaybı miktarları ve termal kararlılıkları TGA yöntemiyle belirlenmiştir. Ayrıca, hazırlanan malzemelerin çözelti özellikleri, viskozite ve elektrolitik iletkenlik gibi özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda, yeni PVA/BM kompozit materyallerin güneş enerjisi dönüşümü ve depolama sistemleri ile cihazlarında potansiyel kullanım için endüstriyel düzeyde uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, hazırlanan kompozitlerin ve filmlerin antimikrobiyal özellikleri de incelenmiştir (Özdemir, 2019).

Polivinil alkol (PVA), sentetik bir polimerdir ve su ile kolayca çözünebilir, suyu çeker ve hidrofiliktir. PVA'nın özellikleri, polimerizasyon derecesi ile hidroliz derecesine bağlıdır. Bu polimerin özellikleri, optik iletimi ve parlaklığı yüksek olması, düşük oksijen geçirgenliği ve köpüklü kaplama özellikleri nedeniyle genellikle polipropilen (PP) ve polivinil klorür (PVC) gibi diğer polimerlere kıyasla birçok avantaja sahiptir (Purde, 2009). Sanayide önemli bir role sahip olan PVA, suda şişme, yayılma ve kolay çözünme gibi özellikler sergiler. Bu geniş kullanım alanı, sentetik polimerlerin önemini artırmaktadır. Ancak PVA'nın termal özellikleri henüz yeterince araştırılmamıştır. Yapısı 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda korunamaz, bu da amorf bir polimer eldesini zorlaştırır. PVA'nın camsı geçiş sıcaklığı 85 °C'dir ve bu sıcaklığın üstünde suda çözünmeye devam eder. Bu polimer, istenen mekanik özelliklere sahip olmasıyla dikkat çeker ve organik çözücülerde yapısını koruyabilir. Steril malzemelerden ilaçlara ve

yara bandı gibi ürünlere kadar çeşitli alanlarda kullanılan önemli bir polimerdir. Ayrıca, tıpta ortopedi alanında kullanılmasının yanı sıra nanofiber özellikleri, hidrojel özellikleri ve kompozitlerinin kristal davranışları üzerine yapılan çalışmalar da mevcuttur (Koysuren ve Koysuren, 2018).

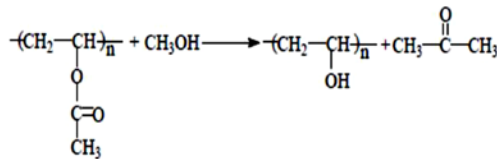
Araştırmacılar, PVA'nın yüzey etkileşimlerini incelemek için çeşitli yöntemler kullanmışlardır. Bu çalışmalar, PVA'nın yüzey morfolojisini suya olan ilgisi ve oksijen içeriği gibi faktörlerin etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, PVA süngerlerinde bulunan fonksiyonel boronik asitlerin kimyasal özellikleri, renkli malzemelerin üretiminde kullanılmıştır. PVA'nın belirli işlemlerle modifiye edilmesi durumunda, yüksek voltajlı spinel pozitif elektrotlar için önemli bir bağlayıcı olarak işlev görebileceği belirlenmiştir (Sözbir ve ark., 2021).

Aksoy (2014) yüksek lisans çalışmasında şunlara değinmiştir: Polilaktik asit (PLA), polivinil alkol (PVA), polikaprolakton (PCL) vb. polimerler bazı durumlarda doğada çözünebilmektedir. Biyobozunur polimerler olarak kabul edilen bu malzemeler kendi başlarına kullanılabilir ayrıca da diğer polimerlerle karıştırılarak kullanılabilir. Maliyetler diğer polimerlere göre genele bakıldığında çok daha yüksek olması sebebiyle odun unu, pirinç ve buğday sapları gibi çeşitli lignoselülozik ürünlerin eklenmesiyle kullanılabilir. Bu çalışmada, polivinil alkol (PVA) ve ek eleman olarak buğday sapı unu (BS) ve kızılçam odunu atığı (KO) kullanarak biyobozunur özelliğe sahip kompozit film çeşitleri üretilmiştir. Bu durumlar ile PVA'nın bozunabilmesi için saf su kullanıldığı bilgisine yer verilmiştir. PVA içerisine takviye elemanı olarak farklı oranlarda buğday sapı unları (%10, 20, 30 ve 40) gibi çekitli oranlarda eklenmiştir. Üretilmiş olan kompozit filmlerin mekanik (çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü ve kopmada uzama), termal, morfolojik ve toprakta bozunma özellikleri öğrenilmiştir. Bu testler sonuçlarında, buğday sapının ununun PVA

matrisine %10 oranında eklenmesi ile çekmeye karşı koymanın azaldığı fakat dolgu maddesinin daha da artırılması (%40'a kadar) ile rakamsal bakımdan herhangi bir değişiklik yaşanmamıştır. Çekmede elastikiyet modülü değerleri buğday sapı ve KO oranında artış ile birlikte iyileştiği ve kopma değerlerinin ve uzama değerlerinin ise azaldığı bulunmuştur. Bunlar sonucunda toprağın içinde küçük bir sürede çözündüğü ve bunun su emiliminden kaynaklandığı bulunmuştur. Isıl özelliklerine bakılacak olursa, buğday sapı unu katılma derecesinin yükselmesiyle birlikte toplam çözünen madde miktarının düşmüş olduğu ve kalan madde miktarının yükseldiği sonucuna varılmıştır (Aksoy, 2014).

PVA'nın Kimyasal Yapısı, Sentezi ve Temel Özellikleri

PVA, PVAL, PVOH, PVA-OH veya PVAI gibi farklı şekillerde isimlendirilmektedir. Diğer bir grup olarak hidroksil grubu eklentili oldukça basit kimyasal yapıya sahip bir polimer olarak bilinmektedir. Monomeri olan vinil alkol, kararlı halde bir monomer olmadığından tautomerisini oluşturacak asetaldehit şekline dönüşür. Bu nedenle de PVA, vinil asetatın polivinil asetata (PVAc) polimer haline getirilmesi sonrasında da PVAc'nin PVA'ya su emdirilmesi ile elde edilir (Şekil 1.3). Fakat su emmede %100 dönüşüm gözlenmez. Bu nedenle PVA her zaman için PVAc ile kopolimer şeklinde bulunur (Chang, 2000). Ticari olarak en yüksek hidrolize PVA %98,5'tir. Hidroliz seviyes, kimyasal özelliği, çözünürlüğü ve PVA'nın kristalleşme özelliği üzerine oldukça ilerlemiş bir etki oluşturur (Tubss, 1996). PVA'nın sentez reaksiyonu aşağıda gösterilmiştir:



Şekil 1.2 PVA'nın sentez reaksiyon gösterimi (Aksoy, 2014)

Hidroliz ve polimerleşme derecesi, özellikle poli(vinil alkol) (PVA)'un su içindeki çözünürlüğünü belirleyen kritik faktörlerdir. Yoğun hidrolize uğramış PVA, su içinde düşük çözünürlüğe sahiptir. Asetat hidrolizinden kaynaklanan durumda, çözünürlük genellikle %87-89 aralığındadır. %70 oranında asetat grubu içeren polimerler organik çözücülerde çözünürken, %30'dan az asetat grubu içerenler suda çözünür. Polimer yapısındaki hidrofobik asetat grupları, hidroksil gruplarının moleküller arası ve içi hidrojen bağlarını zayıflatır. Çözünürlük için genellikle sıcaklığın 70 °C'ye yükseltilmesi gereklidir. Polivinil alkol, amorf bir yapıda olsa da, OH gruplarının hidrojen bağları oluşturabilmesi nedeniyle kristal hale geçebilir. Asetat gruplarının varlığı, PVA'nın kristalizasyon özelliğini etkiler. Daha fazla hidrolize olmuş PVA'nın kristalizasyonu zorlaşır. PVA kristallerinin erime sıcaklığı genellikle 220-240 °C arasındadır. Kuru PVA filminin camsı geçiş sıcaklığı literatürde genellikle 85 °C olarak belirtilir. Bu camsı geçiş sıcaklığı, suyun varlığında belirgin bir şekilde düşer.

PVA, suda çözünebilen ve aynı zamanda hidroksil grupları içeren yapısı sayesinde çapraz bağlanabilen, biyo-uyumlu, biyobozunur ve kristal yapıda olup zehirsizdir. Ayrıca mükemmel film oluşturma, emülsüfiye edici ve yapışkan özelliklere sahip sentetik bir polimerdir. Dünya çapında sentetik suda çözünür polimerler arasında yer alan PVA 'nın geniş uygulama alanları vardır (Taghizadeh ve Sabouri, 2013). Çalışma alanları içerisinde; farmakoloji, biyomedikal, biyoteknoloji, gıda kimyası, kağıt kaplamaları olması ile birlikte suda bozunabilen esnekleşmiş ambalajların üretilmesi yer almaktadır. Hidrojel haline getirilmesi, diğer birçok hidrojel ile kıyaslandığında kan hücreleri ve proteinlerle daha az etkileşime girmesi, biyo-uyumlu olması, düşük yüzey gerilimi, esnek ve yumuşak olması, yüksek su içeriği ve canlı dokularla uyum sağlaması gibi özellikleri nedeniyle medikal alanda geniş kullanım olanağı sunmuştur. (Wang ve Hsieh, 2010; Chaouat

ve ark., 2008; Zhang ve Zhuo, 2000). Ancak, PVA'nın mekanik özelliklerindeki zayıflık, tek başına kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle, zayıf özelliklerini uygulama alanına uygun bir şekilde ilerletebilmek için bir polimerle veya eklenmiş elemanı ile inter-polimer karışımı oluşturmak gerekmektedir (Kantoğlu, 2006). Ayrıca, PVA çevre uygulamalarında sıklıkla kullanılan, geniş kullanım alanına sahiptir.

PVA, liflerin nem çekme özelliğinin fazla olduğundan tekstil endüstrisinde, molekül ağırlığı genellikle küçük olan çeşitlerinin polimerizasyon sistemlerinde emülsiyon haline dönüştürme, sulu yapıştırıcılardaki içeriğinde, Vinil asetallerin üretiminde, televizyon tüplerinde fosforesans pigmentlerin ve boyaların bağlayıcısı olarak, polarize merceklerde kullanılması PVA'nın temel uygulama alanları arasında yer almaktadır (Ünlü, 1987). Ayrıca, PVA, metaller, plastikler ve seramikler için geçici koruyucu kaplama olarak da kullanışlıdır. PVA'nın biyobozunurluğunu geliştirmek, işlenebilirliğini kolaylaştırmak ve üretim fiyatını düşürmek hedefi ile , PVA'nın polar yapısı selüloz gibi çeşitli doğal ürünler kullanılarak kompozitler üretilmektedir (Taghizadeh ve Sabouri, 2013). Bu kapsamda, PVA ve buğday sapı unları kullanılarak PVA esaslı kompozit ürünlerin üretimi gerçekleştirilmiştir (Aksoy, 2014).

Hu ve ark. (2017) yazdıkları makalede, H₂O/TEOS oranının silika/PVA hibrit filmlerinin geçirgenlik, termal stabilite, mekanik mukavemet, yapışma mukavemeti ve higrotermal direnç gibi özellikleri üzerindeki etkisi tartışılmaktadır. PVA ve silika arasındaki güçlü kimyasal etkileşim, XPS sonuçlarında C-OH pikinin zayıflaması ve bir Si-O-C pikinin oluşmasıyla gösterilmiştir. Bu etkileşim ayrıca PVA kristalliğinin %23,29'dan %2,56'ya düşmesi ve silika/PVA erime noktasının 204,3 °C'den 122,0 °C'ye düşmesiyle de doğrulanmaktadır. PVA ve silika arasındaki bu mükemmel uyumluluk, silika/PVA'nın dendritik benzeri veya küresel bir morfoloji ile çözeltide iyi dağılmasını sağlar ve görünür ışık

geçirgenliğinde %97'lik bir artışa yol açar. Bu nedenle, saf PVA ile karşılaştırıldığında, elde edilen silika/PVA hibrit filmler şeffaftır. Malzemedeki silika kütle yüzdesi ağırlıkça %50'nin üzerinde olmasına rağmen, Young modülü $0,17 \pm 0,03$ GPa'dan $2,52 \pm 0,10$ GPa'ya, nihai gerilme mukavemeti $40,1 \pm 9,27$ MPa'dan $80,3 \pm 2,5$ MPa'ya ve yapışma mukavemeti 475 N'den (1,52 MPa) 712 ± 90 N'ye (2,29 MPa) yükselmiştir ve 15 higrotermal yaşlanma döngüsünden sonra neredeyse süper higrotermal direnci koruyabilmektedir. Elde edilen silika/PVA hibritinin mükemmel şeffaflık, termostabilite ve mekanik mukavemete sahip yüksek performanslı bir kaplama olarak kullanılabileceğine inanılmaktadır. (Hu ve ark., 2017).

Bu makale, şeffaf/yapışkan kaplamalar olarak uygulanmak üzere silika/PVA hibrit malzemeleri rapor etmektedir. H₂O/TEOS oranının silika/PVA hibritlerinin oluşumu üzerindeki etkisi, silika ve PVA arasındaki etkileşim, silika morfolojisi, filmin geçirgenliği, termal stabilite ve higrotermal yaşlanmaya karşı yapışma mukavemeti karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çapraz bağlı silika/PVA hibritleri oluşturmak için silika ve PVA arasındaki etkileşim, -OH gruplarının çapraz bağlanması, Si-O-C bağlarının oluşumu, PVA'nın kristalliliğinin %23,29'dan %2,56'ya düşmesi ve silika/PVA hibritinin erime noktasının 204,3°C'den 122°C'ye düşmesi ile doğrulanmıştır. Kimyasal etkileşimli silika/PVA hibritleri, PVA ile daha küçük silika partikülleri veya oligomerleri arasında güçlü hidrojen bağı oluşturmak için bir PVA matrisi içinde iyi dağılmış bir silika sol (düşük H₂O/TEOS oranında elde edilir) kullanılarak elde edilir. Bu güçlü etkileşim, silika/PVA hibritlerine şeffaflık, gelişmiş termal stabilite, hibritte ağırlıkça %50'den fazla silika olsa bile güçlü mekanik ve yapışma mukavemeti sağlar. Silika/PVA hibritleri, saf PVA'ya ($40,1 \pm 9,3$ MPa) kıyasla çok daha yüksek gerilme mukavemeti ($80,3 \pm 2,5$ MPa), saf PVA'ya ($0,17 \pm 0,03$ GPa) kıyasla çok daha yüksek Young modülü ($2,52 \pm 0,10$ GPa)

ve PVA'ya (475 N, 1,52 MPa) kıyasla mükemmel yapışma mukavemeti (715 N, 2,29 MPa) sergilemektedir. Bu yapışma gücü, 15 higrotermal yaşlandırma döngüsünden geçtikten sonra bile hala etkilidir (958 N, 3.07 MPa). Silika ve PVA arasında keşfedilen oluşum mekanizması, silika/PVA hibrit malzemelerin oluşumuna dair yeni bir bakış açısı sunabilir. Sonuçlar, elde edilen silika/PVA hibritlerinin şeffaf ve yapışkan kaplamalar olarak gelecekteki uygulamalar için büyük bir potansiyel sunduğunu kanıtlamaktadır. (Hu ve ark.,2017).

Zhu ve Kun'un (2007) yaptıkları çalışma, polimerizasyon derecesi ve alkoliz derecesi de dahil olmak üzere polivinil alkolün moleküler yapısının, PVA'nın saf polyester, saf pamuk ve polyester/pamuk karışımı elyaflara yapışması üzerindeki etkisi, emdirilmiş fitil üzerinde bir yöntem kullanılarak araştırılmıştır. Yapışma, fitillerin maksimum mukavemeti ve kopma mukavemeti açısından değerlendirilmiştir. Moleküler yapının yapışma üzerinde belirgin bir etkisi olduğu bulunmuştur. Alt tabaka olarak test edilen elyafın türü ne olursa olsun, polimerizasyon derecesinin artması ile yapışma artmıştır. Bununla birlikte, polimerizasyon derecesi 1700'ü aştığında yapışmayı artırma üzerindeki en büyük etkiye ulaşıldığı görülmektedir. PVA'nın alkoliz derecesi, yapışma üzerinde polimerizasyon derecesinden daha az etki göstermektedir. PVA'nın moleküler yapılarının PVA-niştasta karışımlarının liflere yapışması üzerindeki etkisi, tek başına PVA'ninkinden daha azdır. Ayrıca, deneysel sonuçlar yapışma teorisi açısından, dağılma kuvvetleri ve ara yüzeylerdeki iç gerilim ve yapışkan tabakanın kohezif kuvvetleri açısından tartışılmakta ve analiz edilmektedir. (Zhu ve Kun, 2007)

Polivinil alkolün moleküler yapısının, poliester, pamuk ve polyester/pamuk karışımı liflere yapışmasına olan etkisini inceleyen bir makalede Polyvinil alkolün moleküler yapısının, polimerizasyon derecesi ve alkolizasyon derecesi de dahil olmak üzere, PVA'nın saf polyester, saf pamuk ve polyester/pamuk karışımı liflere

yapışmasına etkisi, emprenye edilmiş roving üzerinde kullanılan bir yöntemle incelenmiştir. Deney ; PVA'nın görünür viskoziteleri, bir dönme viskozimetre (NDJ-79) ile 2028 s-1 kesme hızında ölçüldü. PVA örnekleri, karıştırma ve yoğunlaştırma altında distile su ile ayrı ayrı pişirilerek PVA çözeltileri elde edilmiş ve çözeltilerin görünür viskoziteleri oda sıcaklığında belirlenmiştir (%4 konsantrasyonda). PVA'nın uçucu içeriği ve asitlenmiş nişastanın nem içeriği, su ve uçucu bileşenlerin 105 °C'lik bir fırında elemine edilmesi ile tartı yöntemiyle belirlenmiştir. Asitlenmiş nişastanın görünür viskozitesi ölçülmüş, tek fark 2028 s-1 kesme hızıyla yapılan ölçüm olmuş. Nişasta pastalarının viskozite istikrarsızlığı, 2.0 saatlik bir süre boyunca 95 °C'de görünür viskozite dalgalanması yüzdesi olarak ifade edilmiştir. Belirlenme işlemi, nişasta jelatinleşmesinden sonra 1 ile 3.0 saatlik bir süre boyunca gerçekleştirilmiş ve viskozite ölçümleri her 30 dakikada bir alınmış. İstikrarsızlık, referans [10]'e göre hesaplandı. Hazırlanan asitlenmiş nişastanın nem içeriği, görünür viskozitesi ve viskozite istikrarsızlığı sırasıyla %8.50, 10.0 mPa.s ve 9.52%'dir. Deneyde kullanılan çeşitli PVA örnekleri Tablo 1.4'de karakterize edilmiştir.

Tablo 1.4 Kullanılan PVA'nın karakterizasyonu (Zhu ve Kun, 2007)

Numuneler	Polimerizasyon Derecesi	Hidroliz derecesi, %	Uçucu Bileşen Oranı, %	Viskozite, mPa.s
PVA-2499	2400	>%99	6.70	43
PVA-1799	1700	>%99	6.85	27
PVA-0599	500	>%99	8.35	7
PVA-1788	1700	%92	9.64	22
PVA-1788	1700	%88	7.42	26

Tablo 1.5 PVA moleküler yapısının, saf polyester elyafların yapışmasıyla ilgili mukavemet özellikleri üzerindeki etkisi (Zhu ve Kun, 2007)

PVA moleküler yapısı		Maksimum Dayanım		Kopma Enerjisi	
Polimerizasyon Derecesi	Hidroliz derecesi, %	S_m, N	Değişim Katsayısı, %	W_b, J	Değişim Katsayısı, %
500	>99	101.0	8.79	0.847	14.72
1700	>99	108.4	3.39	0.941	6.47
2400	>99	108.8	3.45	0.961	6.01
1700	92	107.9	4.55	0.925	8.33
1700	88	105.3	4.07	0.905	6.70

Deneyin sonucu olarak; PVA'nın moleküler yapısı ile polyester, pamuk ve polyester/pamuk liflerine olan yapışma arasındaki ilişkiler Tablo 1.7'de gösterilmiştir. Açıkça görülebilir ki yapışma, PVA'nın moleküler yapısına bağlıdır. Hangi tür lif kullanılırsa kullanılsın, polimerizasyon derecesi arttıkça yapışma artar. Ancak, polimerizasyon derecesinin 1700'ü aştığında yapışmada maksimum etkinin olduğu görünüyor. Ayrıca, alkolizasyon derecesi azaldıkça yapışma yavaşça azalır. (Zhu ve Kun, 2007)

Tatar (2019) yüksek lisans çalışmasında, farklı endüstrilerde hala kullanılıyor olan epoksi yapıştırıcıların geliştirilmesini amaçlamıştır. Cıvata veya kaynak bağlantısının oluşu doğru olmayan bölgelerde Alüminyum 2024-T3 malzemesi ile karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin birleştirilmesi için kullanılan epoksi yapıştırıcılar, saf naylon 6.6 ve grafen eklenmiş naylon 6.6 nanoelyaflar ile takviye edilmiş saf suyun bu yapıştırıcılar üzerine etkisine bakılmıştır. (Tatar, 2019)

Yapıştırma konusu ile ilgili yapılan çalışmalarda, yapışma olayının etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan koşullar aşağıdaki maddelerle açıklanmıştır. (Petrie, 1975, 2000; Ebnesajjad, 2010).

- Yapıştırıcının sürülecek olan yüzeylere bakılarak bu yüzeylere uygun olarak seçilmesi,

- Bağlantı çeşitlerinin incelenerek uygun olarak ve özenle seçilmesi,

- Yapıştırılacak yüzeylerin kalitesinin test edilmiş olması, pürüzlülükleri ölçülmeli ve temizliğine bakılmalı bunların çıktıları ile seçim yapılması,

- Yüzeylerin su emebilme performansının değerlendirilerek seçim yapılması,

- Islatılma,

- Uygun fiziksel durumlardaki yapıştırma işlemi,

- Yapışma proseslerin kimyasal olarak doğru olarak yapılmasının gerekmektedir. Tüm istenmiş değerleri karşılayan mükemmel bir yapıştırıcının olmadığı unutulmamalıdır. Bu yüzden, kullanıcının seçim yapabilmesi için bu soruları sorarak cevap vermesi istenmektedir (Ebnesajjad ve Landrock, 2014).

- Hangi çeşit yüzey yapıştırıcı ile birleştirilecek?

- Yapıştırıcının hangi sıcaklık aralığında etkili olması bekleniyor?

- Yapıştırıcı hangi kimyasallara temas edecek?

- Yapıştırıcı maruz kalacağı fiziksel ve kimyasal durumlar nelerdir? gibi sorulara cevap aramak için yapılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan malzemeler temel olarak 5 adettir. Bunlar: Epoksi ve katalizör

- Naylon 6.6
- Grafen
- Alüminyum
- Karbon fiber kompozit

Bu araştırmada yapıştırıcı olarak kullanılmış epoksi reçinesi, HEXION tarafından üretilmiş olup, piyasadaki MGS-L285 laminasyon reçinesidir (Şekil 1.3.).



Şekil 1.3 HEXION MGS-L285 laminasyon reçinesi ve kürleştiricisi (Petrie, 1975, 2000; Ebnesajjad, 2010).

23 ° C'de 600-900 MPa viskoz olan bu reçine %80-90 diglisidil eter bisfenol A ve %10-20 alifatik diglisidil eter içerir. Sertleştirici MGS-H285, yine aynı şirket tarafından üretilen % 70-90 sikloalifatik amin ve% 10-30 polioksil alkil aminin bir karışımıdır. Yoğunluğu 0,94-0,97 g / cm³ , karışım oranı ağırlıkça

100: 40 ± 2 kısımdır. Reçinenin mekanik verileri Tablo 1.8’ de verilmiştir.

Tablo 1.8 Epoksi reçinenin mekanik özellikleri (Tatar, 2019)

Mekanik Özellikler	Epoksi
Yoğunluk (g/cm^3)	1.18-1.20
Eğilme Mukavemeti (MPa)	110-120
Çekme Mukavemeti (MPa)	70-80
Basma Mukavemeti	120-140
Darbe Mukavemeti (MPa)	45-55
Elastiklik(kPa)	3.0-3.3
Kopma Uzaması (%)	5.0-6.5

Bu tez yüksek lisans tez çalışması kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan DSC testlerinin en sonunda elde edilen değerleri göre naylon 6.6 nanoelyafların camsı geçiş sıcaklıkları, grafen takviyesi ile birlikte kullanıldığında yükselmiş olduğu gözlemlenmiştir. Grafen eklemesi ile beraber nanoelyafların çapı düşmüştür, bu nedenle yapıştırmak için istenen yüzey alanı değerleri yükselmeye başlamıştır. Epoksi ile hazırlanmış olan yapıştırma birleşim noktalarına naylon 6.6 nanoelyaf eklentisi ile kayma dayanımı ve kayma şekil değiştirmesi değerlerinde yükseliş sağlandığı görülmüştür. Yapıştırma noktalarına ekleme yapılmış olan naylon 6.6 nanoelyafların içine ağırlıklarınca %1 grafen eklentisi sonrası elyafların çapları incelererek yapıştırma noktaları eskisine göre dayanıklı hale gelmiştir. Fakat naylon 6.6 nanoelyafların içerisine ek olarak konulan grafen miktarı %5 seviyesine çıktığında grafen nano partikülleri topak topak olmuş, naylon 6.6 nanoelyaflar bu birikme noktalarından öncesine göre kolay koparak yapıştırma noktaları olumsuz şekilde etkilenmiştir. 91

Grafen topaklanmaları sebebiyle yapıştırma noktalarını kararsız hale getirdiği tespit edilmiştir. Birkaç tane test sonucu %1 grafen takviyesine göre daha iyi çıkarken diğer test değerleri daha kötü çıkmıştır. Yapılan bu test ile yine de %3 grafen takviyesi karşılaştırıldığında tüm bu numunelerin kayma dayanımı ve kayma şekil değiştirmesi açısından daha düşük sonuçlara varılmıştır. Kayma dayanımı ve kayma şekil değiştirmesinde oluşan en yüksek artış ise %3 grafen katkılı naylon 6.6 nanoelyaf takviyeli yapıştırıcılarda elde edilmiş olmuştur. Saf suda şartlanma işlemi ile beraber saf epoksili yapıştırma bağlantılarının maksimum kayma dayanımı ve kayma şekil değiştirme değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Üstelik şartlanma süresi uzadıkça bu değerler azalmaya devam etmiştir. Tespit edilmiş olan çıktılar ile kırılma yüzeylerinin makroskobik, mikroskobik ve SEM sonuçlarına bakıldığında saf suyun zaman içerisinde yapıştırıcı ile yapıştırılmış olduğu yüzey arasında yapıştırma bağlantısının azaldığı fark edilmiştir. Naylon 6.6 nanoelyaf takviyesi ile dayanımları artmış olan yapıştırma numuneleri su içerisinde durduktakça maksimum kayma dayanımı ve kayma şekil değiştirme çıktılarında düşme gözlemlenmiştir. Nedeni ise saf su zaman içerisinde yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey arasına nüfuz etmek ile beraber nanoelyaflar ile epoksi yapıştırıcı arasına da nüfuz etmiştir. Suda bekleme süresi arttıkça bu durum istenen değerleri vermemiş ve uygunsuz etki artmıştır. Lakin saf epoksi ile karşılaştırıldığında her durum için naylon 6.6 nanoelyaf eklentili yapıştırıcıların dayanımları diğerlerine göre daha güzel sonuç vermiştir. Grafen katkılı naylon 6.6 nanoelyaf takviyesi ile kayma dayanımı ve kayma şekil değiştirmesi artmış olan yapıştırma numuneleri suyun içindeki şartlanmalarında aynı şekilde yapıştırma noktalarının düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak yine de grafen katkılı naylon 6.6 nanoelyaf takviyesi ile hazırlanmış olan diğer tüm yapıştırmalar saf epoksili ve naylon 6.6 nanoelyaf eklentili yapıştırıcılara göre çok iyi sonuç vermiştir. Grafen eklenmiş olan naylon 6.6 nanoelyaf eklemesi ile hazırlanan tüm yapıştırmalara

kendi içinde bakıldığında ise %3 grafen katkısının tüm şartlandırma koşulları için kayma dayanımı ve kayma şekil değiştirme çıktılarında çok iyi, olumlu sonuç verdiği sonucuna varılmıştır. Kırılma yüzeylerinin SEM sonuçlarına bakıldığında kırılma mekanizmalarında nano elyafların etkisi olduğu görülmüştür. SEM sonuçlarında suda şartlandırma olayının gerçekleşme durumunun, suyun yapıştırmayı etkileme şekli anlatılmıştır. Tüm bunlar sonucunda bahsedilen bu tezde epoksi yapıştırıcılar farklı şekillerde, çeşitlerde takviyelerle güçlendirilmiş ve literatüre güncel olan yeni bilgiler eklenmiştir. (Tatar, 2019)

Karimi e Navidbakhsh (2014) yaptığı çalışmada, polivinil alkol (PVA) süngerlerinin kısaca doğrusal olmayan viskoelastik (QLV) modelinin ilk bilimsel çalışmasını sunuyor. PVA süngerleri, kıkırdak, karaciğer ve böbrek gibi yumuşak dokuların değiştirilmesi ve onarımı için potansiyel bir implant malzemesi olarak düşünülmüştür. Aynı zamanda, Lasik, katarakt ve refraktif cerrahiler gibi gözde kesim işlemleri sırasında dokuyu manipüle etmek ve sıvıyı emmek için göz içinde kullanılır. Ancak, PVA süngerinin doku değiştirme malzemesi olarak kullanılmasının önemli bir engeli yeterli mekanik özelliklerin eksikliğidir. Bu çalışmada, PVA süngerinin doğrusal olmayan mekanik davranışı deneysel ve hesaplamalı olarak incelenmiştir. PVA süngeri için bir dizi gerilme testi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler kullanılarak Yeoh, Ogden, Mooney-Rivlin ve Neo-Hookean gibi hiperelastik gerilme enerji yoğunluk fonksiyonları kalibre edilmiştir. Bir hiperelastik konstitütif model, süngerin eksenel davranışına en iyi uyum sağlamak için seçilmiştir. Genel tahmin yeteneği, PVA gerilme deneylerinin sonlu eleman simülasyonları kullanılarak doğrulanmıştır. P süngerinin bekletme öncesi maksimum stresi açısından elde edilen sonuçlar, EYETEC ve CENEFOM süngerlerine kıyasla sırasıyla %11.94 ve %20.17 daha fazla stres taşıyabileceğini göstermektedir. P süngerinin şişme oranı, CENEFOM ve EYETEC süngerlerine göre sırasıyla %26.78 ve %1.78 daha fazladır. Dahası, PVA malzemesinin doğrusal olmayan davranışını temsil etmek için Yeoh modeli seçilmiştir, bu da

gelecekteki yumuşak dokuların biyomekanik simülasyonlarında kullanılabilir. Bu çalışma, ilk kez bir eksenel gerilme testi cihazı kullanarak PVA süngerlerinin mekanik özelliklerini inceledi. Çalışmada iki farklı ticari marka kullanıldı ve sonuçlar bu çalışmada üretilen bir süngerle (P sünger) karşılaştırıldı. Stres gevşeme mekanik özellikleri ve şişme oranı ölçüldü. EYETEC ve P süngerinde elde edilen bulgular çok benzerken, CENEFOM farklı sonuçlar gösteriyor. Bu çalışmanın sonuçları, katarakt, Lasik ve refraktif cerrahiler de dahil olmak üzere oftalmik ve plastik cerrahi prosedürlerinde kullanılmak üzere daha iyi özelliklere sahip yeni bir PVA malzemesi üretmek için kullanılabilir. Bu sonuçlar ayrıca özellikle doku mühendisliği ve geniş bir biyomedikal uygulama yelpazesinde biyomalzemeler için sonuçları olabilir. PVA süngerlerinin mekanik özelliklerinin ve şişme oranının değerlendirilmesi, bu malzemenin çoğu oftalmik cerrahi için optimal tasarımı için önemli bir adım olarak düşünülebilir. Mekanik yüklemeye ve bir sıvının difüzyonuna maruz kalan biyobozunur polimerlerin yanıtını tahmin etmek için modifiye edilmiş bir QLV modeli sunduk, bu da biyobozunur stent uygulamaları için uygun olabilir. Bu, PVA süngerinin biyomedikal ve biyomalzeme uygulamalarının diğer alanlarında kullanılmasına yeni bir yol olabilir. Bu PVA malzemesinin hazırlanması, biyopsi hassasiyeti araştırmalarında yumuşak doku deformasyonunun incelenmesi için canlı yumuşak dokunun uygun bir alternatifi olabilir. (Karimi ve Navidbakhsh, 2014).

Noushini, Samali ve Vessalas (2013) yaptığı çalışmada, polivinil alkol (PVA) liflerinin kaplanmamış olarak fiber takviyeli betonun (FRC) dinamik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. İki farklı geometrik uzunluktaki (6 ve 12 mm) PVA lifleri, sırasıyla 428 ve 857 olan en-boy oranıyla kullanılmıştır. Uçuş külleri, tüm karışımlarda Portland çimentosunun kısmi olarak yerine kullanılmıştır. Toplam beton hacmine dayalı olarak, FRC'nin temel frekansı, dinamik elastiklik modülü ve sönüm oranı üzerinde etkilerini değerlendirmek için iki farklı lif fraksiyonu olan %0.25 ve %0.5 incelenmiştir. Ayrıca, 28 günlük statik mekanik özellikler de

ölçülmüştür. Sonuçlardan, bu çalışmada kullanılan düşük hacim fraksiyonlarındaki PVA lif ilavesinin FRC'nin mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırmasına rağmen, beton malzemesinin sönüm özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı söylenebilir. Elde edilen tabloda, 0.0% ile 0.5% arasında değişen farklı lif hacim fraksiyonlarına sahip kontrol ve lif takviyeli betonların 28 günlük basınç dayanımları sunulmaktadır. Her beton setinin basınç dayanımları için hesaplanan standart sapmalar, test edilen 3 numunenin ortalamadan ne kadar farklı olduğunu göstermektedir. Düşük bir standart sapma, test numunelerinin bireysel basınç dayanımlarının, rapor edilen ortalama dayanım ile çok yakın olma eğiliminde olduğunu gösterir ve bu da istatistiksel olarak güvenilir bir ortalama dayanım seviyesi ile ilişkilidir. Test numunelerinin ortalaması, AS 1012.9'a uygun olarak 0.5 MPa'ya en yakın olarak hesaplanmıştır. (Noushini, Samali ve Vessalas, 2013).

Literatürdeki bazı bulgulara karşı, sonuçlar lif içeriği belirli bir seviyenin üzerine çıktığında basınç dayanımını artırmadığını göstermektedir. Ayrıca Li tarafından da belirtildiği gibi, basınç dayanımı başlangıçta artabilir ancak lif hacim fraksiyonu arttıkça düşebilir.

Sonuçlara bakıldığında daha düşük lif ilavelerine sahip FRC'lerin kontrol betona göre daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı lif hacim fraksiyonunda, daha kısa liflerin daha uzun olanlardan daha fazla basınç dayanımını artırdığı belirtilmektedir. Bu, daha yüksek hacim veya uzunluktaki liflerin karıştırma sırasında titreşimi ve konsolidasyonu zorlaştırarak, daha fazla gözeneklilik oluşturabileceği bir durumu açıklayabilir. Malzeme özellikleri, gözeneklilik ve gözenek boyutu dağılımı gibi mikroyapısal özelliklerden büyük ölçüde etkilendiği için, matris içindeki gözenek bağlantılarını artıran daha fazla lif, kompozitin zayıflamasına neden olabilir. Benzer bulgular, diğer

araştırmacılar tarafından daha önce polipropilen gibi diğerk sentetik lifler için de rapor edilmiştir. (Noushini, Samali ve Vessalas, 2013)

Thong ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada şu bulgulara elde etmişlerdir: Polivinil alkol (PVA), yaklaşık 90 yıl önce ilk sentetik kolloid olarak oluşturuldu ve o zamandan beri çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. PVA'nın önemli uygulamalarından biri inşaat endüstrisinde kullanılmasıdır. PVA'nın, imento esaslı kompozit malzemelerde modifikatör, agrega yüzey ön işlem ajanı ve lif takviyesi olarak kullanılabileceğibulunmuştur. Bu makale, PVA'nın fiziksel özelliklerini gözden geçirir ve PVA'nın imento esaslı kompozit malzemelerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini tartışır. PVA'nın imento esaslı kompozit malzemelerde kırık yüzeylerindeki değışiklikler, arayüzey geçiş bölgesi (ITZ) yapısı ve ITZ bileşimine etkileri de sunulmaktadır. Ayrıca, inşaat endüstrisinde PVA'nın gelecekteki gelişimi için araştırma ihtiyaçları da ele alınmaktadır. Beton retiminde agregaların büyük bir hacmi kapladığı ve doğal kaynakların tükenmesiyle, katı atıkların inşaat malzemeleri olarak kullanımının gelecekteki en büyük zorluklardan biri haline geldiğibilinmektedir. İnşaat endüstrisinde katı atık malzemelerin kullanımını çeşitlendirmek için, katı atık agregalarının özelliklerinin geliştirilmesi gerekebilir. Agregaların kalitesinin, PVA ile yapılan işlemlerle iyileştirilebileceğibulunmuştur. Ancak, oğa araştırma alışması, PVA'nın modifikatör olarak kullanımına ve imento esaslı kompozitlerde takviye olarak PVA liflerinin kullanımına odaklanmıştır ve beton üretiminde agregaların PVA ile işlenmesine yönelik sınırlı araştırma bulunmaktadır. Bu nedenle, PVA'nın katı atık agregalar için ön işlem ajanı olarak potansiyel kullanımını doğrulamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu araştırma, PVA'nın kısa ve uzun vadeli mühendislik beton özelliklerini, işlenmiş agregaların pastayla olan mikroyapısal ilişkisini inceleyerek desteklemelidir. Bunun yanı sıra, PVA ile işlenmiş agregat betonun özellikleri üzerinde iyileşme koşullarının

etkisi hakkında sınırlı veri bulunmaktadır. Bu nedenle, farklı iyileştirme koşullarında PVA ile işlenmiş agregat betonunun pratik kullanımını değerlendirmek için daha fazla araştırma yapılabilir. Polivinil alkolün (PVA) inşaat endüstrisinde, özellikle çimento esaslı malzemelerdeki uygulamaları, ilk oluşturulduğundan bu yana geliştirilmiştir. PVA, suyla çözünebilen sentetik bir polimerdir ve çimento esaslı malzemelerde modifikatör olarak, agregat yüzey ön işlem ajanı olarak ve takviye malzemesi olarak kullanılabilir. Genel olarak, çoğu araştırmacı PVA'nın çimento esaslı malzemelerde kullanımının mühendislik özellikleri üzerinde olumlu etkileri olduğunu bulmuştur. Ancak, bazı araştırmacılar bunun aksini rapor etmiştir. Mikroyapı davranışı açısından, PVA'nın varlığıyla birlikte agregat ve pasta arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin kalınlığının ve Ca(OH)_2 oluşum miktarının azaldığı, bu durumun pastanın agregat ile daha iyi yapışmasına katkıda bulunduğu bulunmuştur. (Thong, Teo ve Ng, 2016).

Kaynakça

Aksoy, H. G. (2014). PVA esaslı odun polimer kompozitlerin üretimi ve bazı özelliklerinin belirlenmesi (Yüksek lisans tezi). Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.

Aruldass, S., Mathivanan, V., Mohamed, A. R., ve Tye, C. T. (2019). Factors affecting hydrolysis of polyvinyl acetate to polyvinyl alcohol. Journal of Environmental Chemical Engineering, 7(5), 103417.

Beşergil, B. (2016). Kompozitler: Temel ilkeler test metodları. Türkiye.

Briscoe, B., Luckham, P., ve Zhu, S. (2000). The effects of hydrogen bonding upon the viscosity of aqueous poly(vinyl alcohol) solutions. Polymer, 41(10), 3851-3860.

Ebnesajjad, S., ve Landrock, A. H. (2014). Adhesives technology handbook. Elsevier.

Gautam, L., Warkar, S. G., Ahmad, S. I., Kant, R., ve Jain, M. (2021). A review on carboxylic acid cross-linked polyvinyl alcohol: Properties and applications. Polymer Engineering & Science, 61(2), 225-246.

Hu, P., Hu, S., Chen, L., Gu, G., Pan, J., Hou, W., ve ark. (2017). A silica/PVA adhesive hybrid material with high transparency, thermostability and mechanical strength. RSC Advances, 7(5), 2450-2459.

Karimi, A., ve Navidbakhsh, M. (2014). Mechanical properties of PVA material for tissue engineering applications. Materials Technology, 29(2), 90-100.

Kantoğlu, Ö. (2006). Gama ışınlaması ile sentezlenen poli(N-vinilpirolidon-ko-itakonik asit)/poli(vinil alkol) ağ yapılı inter-polimer kompleksleri ve özelliklerinin incelenmesi (Doktora tezi). Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Koysuren, H. N., ve Koysuren, O. (2018). Preparation of polyvinyl alcohol composite nanofibers and solid-phase photocatalytic degradation of polyvinyl alcohol. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33(4), 1411-1418.

Noushini, A., Samali, B., ve Vessalas, K. (2013). Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. Construction and Building Materials, 49, 374-383.

Özdemir, Y. (2019). Poli(vinil alkol) (PVA) / bor minerali (BM) kompozit maddesinin hazırlanması, karakterizasyonu ve çözelti özelliklerinin incelenmesi (Yüksek lisans tezi). Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep.

Petrie, E. M. (2000). Handbook of adhesives and sealants. McGraw-Hill Education.

Purde, Ö. (2009). Endüstri ürünleri tasarımında kullanılan çevre dostu plastik malzemeler ve plastiğin geri kazanımı (Doktora tezi). Marmara Üniversitesi, İstanbul.

SolidWorks. (2025). SolidWorks yazılımı. <https://www.solidworks.com/tr> adresinden erişildi.

Sözbir, G. D., ve ark. (2021). Farklı oranlarda bozunmuş kayın lifi eklenmiş PVA ve PÜ tutkallarının yongalevhanın higroskopik özellikleri üzerine etkisi. Turkish Journal of Forest Science, 5(2), 327-338.

Taghizadeh, M. T., ve Sabouri, N. (2013). Biodegradation of polyvinyl alcohol–wheat starch composite films by some bacterial strains. International Journal of Environmental Science and Technology, 10(6), 1185-1192.

Tatar, A. C. (2019). Saf suyun alüminyum kompozit levhaların yapıştırma bağlantılarındaki naylon 6.6 nanofiber takviyeli yapıştırıcılara etkisi (Yüksek lisans tezi). Konya Teknik Üniversitesi, Konya.

Thong, C. C., Teo, D. C. L., ve Ng, C. K. (2016). Application of polyvinyl alcohol (PVA) in cement-based composite materials: A review of its engineering properties and microstructure behavior. Construction and Building Materials, 107, 172-180.

Ünlü, H. (1987). Polivinil alkol eldesi ve kullanım alanları. (Uzmanlık tezi). İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Zhu, Z., ve Kun, Q. (2007). Effects of the molecular structure of polyvinyl alcohol on the adhesion to fibre substrates. Fibres and Textiles in Eastern Europe, 15(1), 82-86.

BÖLÜM 6

BİYOBOZUNUR METALLERİN EKLEMELİ İMALATINDA GÜNCEL GELİŞMELER

Furkan CENGİZ¹

Giriş

Biyobozunur metalik alaşımlar, doku yenilenme süreciyle uyumlu olacak şekilde ayarlanabilen bozunma kinetikleri sayesinde geçici mekanik destek sunarak yenilikçi bir çözüm ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, implantın görevini tamamladıktan sonra vücutta kendiliğinden çözünmesini sağlayarak ikinci bir cerrahi müdahale gereksinimini ortadan kaldırmaktadır. Bu kapsamda magnezyum (Mg), demir (Fe) ve çinko (Zn) esaslı alaşımlar, sahip oldukları özgün mekanik ve biyolojik özellikler nedeniyle çeşitli klinik uygulamalar için öne çıkan adaylar arasında yer almaktadır (Zheng et al., 2014).

¹ Öğr. Gör. Dr., Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Kilis, Türkiye, 0000-0003-0011-5476

Magnezyum alaşımları; düşük yoğunlukları, kemik dokusuna yakın elastik modülleri ve nispeten hızlı bozunma süreleri (yaklaşık 3–6 ay) ile dikkat çekmektedir. Korozyon süreci sonucunda oluşan ana ürün olan magnezyum hidroksit, zamanla suda çözünebilen bileşiklere dönüşerek vücuttan güvenli bir şekilde uzaklaştırılmaktadır. Ayrıca magnezyum, insan metabolizmasında çok sayıda biyokimyasal reaksiyonda rol alan temel bir eser element olup, biyolojik uyumluluğu destekleyen bir etki göstermektedir (Bao et al., 2019).

Demir esaslı alaşımlar ise yüksek mukavemet ve tokluk özellikleri sayesinde özellikle yüksek mekanik yüklere maruz kalan implant uygulamaları için uygun kabul edilmektedir. Bununla birlikte, vücut içindeki bozunma hızlarının oldukça yavaş olması (bir yıldan uzun süreler) klinik kullanım alanlarını sınırlamakta ve daha hızlı korozyon davranışı sergileyen yeni alaşım tasarımlarının geliştirilmesini gerekli kılmaktadır (Paim et al., 2020).

Çinko alaşımları, mekanik özellikler ve bozunma hızı açısından magnezyum ve demir alaşımları arasında bir denge sunmaktadır. Orta seviyede mekanik dayanım ve yaklaşık 3–12 ay aralığında değişen bozunma süreleri, bu alaşımları biyobozunur implantlar için cazip hâle getirmektedir. Bunun yanı sıra çinko, bağışıklık sisteminin düzenlenmesi ve yara iyileşmesi gibi biyolojik süreçlerde rol oynayan önemli bir mikro elementtir (John et al., 2010).

Geleneksel üretim yöntemleri (döküm, dövme ve talaşlı imalat), karmaşık geometrilerin ve hasta özel implant tasarımlarının elde edilmesinde önemli kısıtlamalara sahiptir. Buna karşılık, eklemeli imalat teknolojileri ve özellikle seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi, bu sınırlamaların aşılmasına olanak tanımaktadır. SLE, hassas geometrik kontrol, ayarlanabilir porozite ve uygulamaya özel mekanik özelliklerin elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Yap et al., 2015).

SLE süreci, metal tozunun yüksek enerjili bir lazer ışını kullanılarak sayısal üç boyutlu modele uygun şekilde katman katman ergitilip katılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu yöntem, özellikle trabeküler kemik yapısını taklit eden karmaşık kafes mimarilerinin üretilmesine olanak tanıyarak, osseointegrasyonu destekleyen ve kontrollü bozunma davranışı sergileyen implantların geliştirilmesini mümkün kılmaktadır (Aufa et al., 2022).

Biyobozunur alaşımların ve bu alaşımların eklemeli imalat ile üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesinde kayda değer ilerlemeler sağlanmış olmasına rağmen, çözüm bekleyen çeşitli sorunlar hâlen varlığını sürdürmektedir. Özellikle bozunma hızının güvenilir ve öngörülebilir biçimde kontrol edilebilmesi, mekanik özellikler ile bozunma davranışı arasındaki dengenin sağlanması, reaktif metallerle çalışmaya özgü üretim ve proses zorlukları ile klinik kullanıma yönelik standartlaştırma ve sertifikasyon gereklilikleri, bu alanda daha kapsamlı araştırmaların yapılmasını gerekli kılmaktadır (Qin et al., 2019; Wadge et al., 2021).

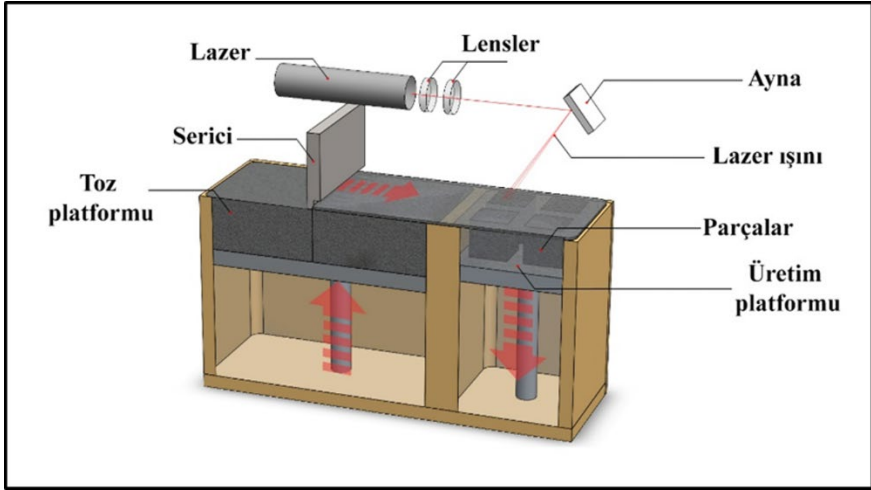
Seçici Lazer Ergitme Prosesi

Seçici lazer ergitme (Selective Laser Melting, SLM), biyobozunur metalik implantların üretimi için umut vadeden bir eklemeli imalat (Eİ) teknolojisidir. Bu yöntem, metal tozunun yüksek enerjili bir lazer ışını ile katmanlar hâlinde ergitilmesine dayanır. SLE, Toz Yatağı Füzyonu (Powder Bed Fusion, PBF) yöntemleri sınıfında yer almakta olup, üç boyutlu yapıların ardışık iki boyutlu katmanların oluşturulması yoluyla üretilmesini sağlamaktadır (Soni et al., 2024).

SLE üretim süreci temel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır (Şekil 1):

1. Üretim platformu üzerine, genellikle 20–100 µm kalınlığında ince bir metal tozu tabakasının, serici bıçak veya merdane mekanizması yardımıyla serilmesi.

2. Dijital modelin ilgili kesit geometrisine uygun olarak, serilen toz tabakasının lazer ışını ile seçici biçimde ertilmesi.
3. Üretim platformunun, bir katman kalınlığı kadar aşağı yönde hareket ettirilmesi.
4. Yeni bir toz tabakasının uygulanması ve lazerle ertme işleminin tekrarlanması.
5. Bu adımların, parçanın nihai geometrisi elde edilinceye kadar ardışık olarak sürdürülmesi (Sefene, 2022).



Şekil 1. SLE Yönteminin Şematik Gösterimi

Biyobozunur Metallerle Çalışmada Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

SLE sürecinde biyobozunur metallerle çalışmak, bu malzemelerin fizikokimyasal özellikleri ve nihai ürünlerden beklenen gereklilikler nedeniyle birtakım kendine özgü özellikler içermektedir. Belirlenen özelliklere sahip implantların başarılı bir şekilde üretilmesi için, bu hususların üretim süreci boyunca dikkate alınması gerekmektedir.

Biyobozunur Metallerde Reaktivite ve Sıcaklık Rejiminin Önemi

Biyobozunur metaller (magnezyum, çinko ve demir), yüksek reaktiviteleri ve kendilerine özgü termal özellikleri nedeniyle SLE yönteminde üretilmeleri zor olan malzemeler arasında yer almaktadır. Özellikle magnezyum ve çinko, oksijenle kolaylıkla reaksiyona girerek yüzeyde oksit tabakaları oluşturmakta; bu durum ergime kalitesini olumsuz etkilemekte ve nihai üründe porozite artışına yol açabilmektedir. Ayrıca magnezyumun düşük kaynama sıcaklığı (1090 °C) ve çinkonun nispeten düşük ergime sıcaklığı (419,5 °C), lazer etkileşimi sırasında malzeme buharlaşması riskini artırarak proses kararlılığını bozabilmektedir (Liu et al., 2019). Buna karşılık, demir esaslı alaşımların ergitilmesi daha yüksek enerji girdisi gerektirse de, lazer etkisi altında alaşım elementlerinin seçici buharlaşması meydana gelebilmekte ve bu durum kimyasal bileşimde değişimlere neden olabilmektedir (Kruth et al., 2004).

Bu nedenlerle, biyobozunur metallerin SLE yöntemiyle üretiminde, koruyucu atmosferin etkin biçimde kontrol edilmesi ve lazer işlem parametrelerinin hassas şekilde ayarlanması kritik öneme sahiptir.

Proses Parametrelerinin Belirlenmesi ve Yapısal–Faz Kontrolü

Biyobozunur metallerin SLE yöntemiyle üretilmesi, optimum özelliklerin yalnızca dar bir ‘proses penceresi’ içerisinde elde edilebilmesi nedeniyle işlem parametrelerinin hassas biçimde kontrol edilmesini gerektirmektedir. Magnezyum esaslı alaşımlarda enerji yoğunluğu kritik bir parametre olup, bu değer tam ergimenin sağlanmasının yanı sıra malzeme buharlaşmasının önlenmesi açısından belirleyici rol oynamaktadır. Uygun enerji girdisi, ince taneli bir mikro yapı oluşumunu destekleyerek mekanik dayanımı artırmakta; ancak aynı zamanda korozyon hızının yükselmesine de neden olabilmektedir. Çinko alaşımlarında ise soğuma hızı öne çıkan

bir parametre olup, tane boyutu ve dolayısıyla mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

Demir esaslı alaşımların SLE ile üretimi, yüksek lazer gücü gereksinimi nedeniyle tarama hızının dikkatli biçimde ayarlanmasını zorunlu kılmakta; aksi hâlde artık gerilmeler ve çatlak oluşumu söz konusu olabilmektedir. Bununla birlikte, SLE parametreleri aracılığıyla γ ve ε martenzit fazları arasındaki oranların kontrol edilebilmesi, bozunma davranışının düzenlenmesine imkân tanımaktadır. SLE sürecinde gerçekleşen hızlı soğuma, yüksek kusur yoğunluğuna sahip denge dışı mikro yapıların oluşmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, biyobozunur metallerin SLE ile üretilmesi, her bir alaşım sisteminin kendine özgü özellikleri ile hedeflenen mekanik ve biyolojik performans kriterlerinin birlikte değerlendirildiği bütüncül bir yaklaşımı gerekli kılmaktadır (Gajanan et al., 2019; Kraner et al., 2021; Qin et al., 2020).

İkincil İşlemler, Sterilizasyon ve Bozunma Hızının Kontrolü

SLE yöntemiyle üretilen implantlar, istenen mekanik özelliklerin ve biyolojik güvenliğin sağlanabilmesi amacıyla üretim sonrası özel işlemler gerektirmektedir. Özellikle magnezyum esaslı alaşımlar için uygulanan geleneksel ısıtım işlem yöntemleri, yüksek oksidasyon riski nedeniyle sınırlı etkinlik gösterebilmektedir. Bu nedenle mikro-ark oksidasyonu ve plazma elektrolitik oksidasyon gibi yüzey işlemleri ile hidroksiapatit ve polilaktit gibi biyoyumlu kaplamalar, korozyon direncinin artırılması ve biyoyumluluğun iyileştirilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Jo et al., 2011).

Bozunma hızının kontrolü, biyobozunur implantların tasarımında temel hedeflerden biridir. Bu amaçla alaşımlama yoluyla korozyon direncinin artırılması, yüzey modifikasyonları ile koruyucu tabakaların oluşturulması, porozitenin düzenlenmesiyle etkin yüzey alanının kontrol altına alınması ve SLE işlem

parametreleri aracılığıyla tane boyutu ile faz bileşiminin ayarlanması gibi çeşitli yaklaşımlar uygulanmaktadır. Bu stratejilerin birlikte kullanılması, önceden belirlenmiş bozunma hızlarına sahip implantların geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Bunun yanı sıra, sterilizasyon yönteminin seçimi de kritik öneme sahiptir; zira biyobozunur metaller agresif ortamlara ve yüksek sıcaklıklara karşı duyarlılık gösterebilmektedir. Yapılan çalışmalar, magnezyum esaslı implantlarda gama radyasyonu ile sterilizasyonun, malzeme özellikleri üzerinde en az olumsuz etkiye sahip yöntemlerden biri olduğunu ortaya koymaktadır (Han et al., 2013; Seitz et al., 2011).

Temel Proses Parametreleri ve Etkileri

SLE yöntemiyle üretilen biyobozunur implantların kalite ve performans özellikleri, büyük ölçüde proses parametreleri tarafından belirlenmektedir. Bu parametrelerin optimize edilmesi; istenen yoğunluk düzeyinin, uygun mikro yapının, hedeflenen mekanik özelliklerin ve kontrollü bir malzeme bozunma hızının elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Lazer Gücü

Lazer gücü, SLE sürecinde malzemeye aktarılan enerji miktarını belirleyen en kritik parametrelerden biridir. Optimum lazer gücü, işlenen malzemenin termofiziksel özelliklerine bağlı olup, tozun tamamen ergitilmesini sağlarken aşırı ısınma ve buharlaşmayı önleyecek şekilde seçilmelidir. Yapılan çalışmalar, AZ91D gibi magnezyum esaslı alaşımlar için uygun lazer gücü aralığının 100–200 W olduğunu göstermektedir (Liu & Guo, 2020). Lazer gücünün 100 W'ın altına düşmesi durumunda, tozun tam olarak ergitilememesi sonucu poroz yapılar oluşmakta; buna karşılık 200 W'ın üzerindeki güç değerleri yoğun magnezyum buharlaşmasına neden olarak kimyasal bileşimde değişimlere ve anahtar deliği

(keyhole) tipi kusurların ortaya çıkmasına yol açmaktadır (Palanivel et al., 2015).

Daha yüksek ergime sıcaklığına sahip demir esaslı alaşımların SLE ile üretilmesinde ise daha yüksek lazer gücü değerleri gerekmektedir. Bu kapsamda, yapılan deneysel çalışmalar, Fe–Mn–Al–Ni alaşımı için en uygun yoğunluk ve mekanik özelliklerin elde edilebilmesi amacıyla lazer gücünün en az 200 W seviyesinde olması gerektiğini ortaya koymuştur (Ewald et al., 2021). Öte yandan, çinko esaslı alaşımlar düşük ergime sıcaklıkları nedeniyle daha düşük lazer gücü aralıklarında (80–150 W) işlenebilmekte olup, aşırı ısınma ve buharlaşmanın önlenmesi açısından lazer gücünün hassas biçimde kontrol edilmesi kritik öneme sahiptir (Deng et al., 2020).

Tarama Hızı

Lazer ışınının tarama hızı, lazer–malzeme etkileşim süresini doğrudan etkileyerek nüfuziyet derinliği, ergime havuzunun boyutu ve soğuma hızı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Magnezyum esaslı alaşımlar için uygun tarama hızının 400–800 mm/s aralığında olduğu bildirilmektedir. Daha düşük tarama hızlarında aşırı ısınma ve ergime havuzunun kontrolsüz büyümesi söz konusu olurken, daha yüksek hızlarda ise tozun tam olarak ergitilememesi nedeniyle bağlanma kusurları oluşabilmektedir (Zhang et al., 2020).

Demir esaslı alaşımlar, daha yüksek ısıya dayanımlı yapıları sayesinde daha geniş bir tarama hızı aralığında işlenebilmektedir. Bu bağlamda, literatürde Fe–Mn–Al–C alaşımı için optimum tarama hızının yaklaşık 800 mm/s olduğu ve bu koşulda uygun yoğunluk ile mekanik özelliklerin elde edilebildiği bildirilmiştir (Xie et al., 2024). Çinko esaslı alaşımlarda ise düşük ergime sıcaklığı ve buharlaşma eğilimi nedeniyle termal girdinin hassas biçimde kontrol edilmesi gerekmekte olup, bu durum tarama hızının genellikle 300–600 mm/s

gibi daha düşük değerlerle sınırlandırılmasına yol açmaktadır (Pola et al., 2020).

Katman Kalınlığı ve Yana Kayma

Katman kalınlığı ile tarama izleri arasındaki mesafe, lazer enerjisinin mekânsal dağılımını ve bitişik ergime havuzları arasındaki örtüşme derecesini belirleyen temel parametrelerdir. Biyobozunur metaller için katman kalınlığının genellikle 20–50 µm aralığında seçilmesi uygun kabul edilmektedir. Daha ince katmanlar, boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesini artırmakla birlikte üretim süresinin uzamasına neden olurken; daha kalın katmanlar üretkenliği artırmasına rağmen yetersiz nüfuziyet ve mekanik özelliklerde azalma riskini beraberinde getirmektedir (Venezuela & Dargusch, 2020).

Tarama izleri arasındaki mesafe, bitişik ergime havuzları arasında yeterli bağlanmanın sağlanabilmesi için genellikle %20–30 oranında bir örtüşme oluşturacak şekilde belirlenmelidir. Bu kapsamda, kullanılan malzeme türüne ve lazer nokta çapına bağlı olarak tarama aralığı değerleri çoğunlukla 60–120 µm aralığında değişmektedir (Rabeeh & Hanas, 2022).

Tarama Stratejisi

Tarama stratejisi (lazer ışınının izlediği yol şeması), ısının yapı içerisindeki dağılımını, artık gerilmeleri ve oluşan mikro yapıyı doğrudan etkilemektedir. SLE sürecinde yaygın olarak kullanılan tarama stratejileri arasında tek yönlü veya katmanlar arasında yön değiştirilerek uygulanan doğrusal (raster) tarama, ada (satranç tahtası) stratejisi ve kontur taraması yer almaktadır. Oksidasyon ve buharlaşma eğilimi yüksek olan magnezyum ve çinko gibi metaller için, katmanlar arasında tarama yönünün döndürölmesi esasına dayanan stratejilerin tercih edilmesi, daha homojen bir ısı dağılımı sağlamak ve mekanik özelliklerdeki yönlenme (anizotropi) etkisini azaltmaktadır (Bai et al., 2024).

Enerji Yoğunluğu

Enerji yoğunluğu, lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığının birleşik etkisini yansıtan bütüncül bir parametre olup, SLE sürecinde aktarılan enerji miktarını tanımlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu parametre, Denklem (1) ile hesaplanmakta olup burada E hacimsel enerji yoğunluğunu (J/mm^3), P lazer gücünü (W), V tarama hızını (mm/s), H tarama aralığını (mm) ve D katman kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

$$E = \frac{P}{V*H*D} \quad (1)$$

Her bir biyobozunur metal türü için, tozun tamamen ergitilmesi ile üretim kusurlarının en aza indirilmesi arasında denge sağlayan optimum bir enerji yoğunluğu aralığı bulunmaktadır. Literatürde bildirildiği üzere, magnezyum esaslı alaşımlar için bu aralık $120\text{--}150 \text{ J}/\text{mm}^3$, demir esaslı alaşımlar için $150\text{--}200 \text{ J}/\text{mm}^3$ ve çinko esaslı alaşımlar için ise $100\text{--}130 \text{ J}/\text{mm}^3$ olarak bildirilmiştir (Mouzou et al., 2016).

Eklemeli İmalat İçin Toz Malzemelere İlişkin Gereklilikler

Biyobozunur implantların SLE yöntemiyle üretiminde kullanılan metal tozlarının kalitesi, birbiriyle ilişkili çok sayıda parametre tarafından belirlenmektedir. Bu kapsamda, boyutsal hassasiyet ile akışkanlık arasında denge sağlayabilmek amacıyla, parçacık boyut dağılımının genellikle $15\text{--}63 \mu\text{m}$ aralığında olması tercih edilmektedir. Dar dağılıma sahip tozlar için tipik olarak $D_{10} = 20\text{--}25 \mu\text{m}$, $D_{50} = 30\text{--}40 \mu\text{m}$ ve $D_{90} = 50\text{--}60 \mu\text{m}$ değerleri uygun kabul edilmektedir.

Parçacık morfolojisi, toz yatağının homojenliği ve ergime davranışı açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, küreselliği yüksek ve yuvarlaklık katsayısı en az 0,85 olan toz partikülleri SLE uygulamaları için öncelikli olarak tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra, kullanılan tozların kimyasal saflığı, biyomedikal uygulamalara

yönelik olarak ISO 13485 ve ASTM F3049 gibi uluslararası standartların öngördüğü katı gereklilikleri karşılamalıdır.

Metal tozu üretiminde farklı yöntemler kullanılmakta olup, her bir yöntemin kendine özgü avantajları bulunmaktadır. Gaz atomizasyonu, yüksek küresellik ve saflık sağlamasıyla öne çıkarken; plazma küreselleştirme yöntemleri parçacık şeklinin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Mekanik alaşımlama, karmaşık bileşimli alaşımların elde edilmesine olanak tanırken; hidrit–dehidrit yöntemi ise yüksek saflıkta toz üretimi açısından avantaj sunmaktadır.

Belirli biyobozunur metaller için ise özel teknolojik yaklaşımlar önerilmektedir. Magnezyum tozlarının, inert argon atmosferinde gaz atomizasyonu ile üretilmesi ve ardından küreselleştirme işlemlerine tabi tutulması uygun bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Demir esaslı tozlar için vakum plazma atomizasyonu tercih edilirken, çinko tozlarının üretiminde kontrollü soğutma koşullarına sahip gaz atomizasyonu en uygun yöntem olarak değerlendirilmektedir. Bu parametrelere uyulması, SLE sürecinin tekrarlanabilirliğini sağlamakta ve implantların kontrollü biyobozunma davranışlarının elde edilmesine katkı sunmaktadır (Choi et al., 2017).

Biyobozunur Alaşımların Eklemeli İmalatında Karşılaşılan Sorunlar

Biyobozunur metalik implantların eklemeli imalatı alanında önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, bu malzemelerin klinik uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmasını sınırlayan çeşitli çözülmemiş sorunlar hâlen varlığını sürdürmektedir.

Bozunma Hızının Kontrollü

Biyobozunur implantların geliştirilmesinde karşılaşılan temel sorunlardan biri, implantın bozunma hızının doku yenilenme

süreciyle uyumlu, öngörülebilir ve kontrollü bir şekilde ayarlanabilmesidir. Aşırı hızlı bozunma, mekanik bütünlüğün erken kaybına ve olumsuz biyolojik tepkilere yol açarken; çok yavaş bozunma ise biyobozunurluğun sağladığı avantajları ortadan kaldırmaktadır. Bu kontrolün sağlanmasını zorlaştıran faktörler arasında, in vitro ve in vivo koşullar arasındaki farklılıklar, biyolojik ortamın etkileri ve hasta bazlı fizyolojik değişkenlikler yer almaktadır.

Başlıca biyobozunur metal sistemleri, fizyolojik koşullar altında belirgin şekilde farklı bozunma kinetikleri sergilemektedir. Magnezyum esaslı implantlar genellikle 1,0–3,0 mm/yıl aralığında bozunma hızına sahip olup, saf magnezyum en yüksek bozunma hızlarını (yaklaşık 3 mm/yıl) göstermektedir. Alaşımlı magnezyum sistemlerinde ise bu hız daha kontrollü seviyelere indirilebilmektedir. Demir esaslı malzemeler çok daha yavaş bozunma davranışı sergileyerek genellikle 0,1–0,5 mm/yıl aralığında değerler göstermekte; bazı ortamlarda saf demirin bozunma hızı 0,008 mm/yıl gibi oldukça düşük seviyelere kadar inebilmektedir. Çinko esaslı alaşımlar ise 0,2–0,5 mm/yıl aralığındaki bozunma hızlarıyla bu iki sistem arasında ara bir konumda yer almaktadır.

Bozunma davranışı üzerinde hem metalürjik hem de çevresel faktörler belirleyici rol oynamaktadır. Eklemeli imalatla üretilen metallerin tane boyutu, faz dağılımı ve dislokasyon yoğunluğu gibi mikro yapısal özellikleri, korozyon mekanizmalarını doğrudan etkilemektedir. SLE ile elde edilen ince taneli ve yüksek tane sınırı yoğunluğuna sahip yapılar, genellikle kaba taneli yapılara kıyasla daha hızlı bozunma eğilimi göstermektedir. Faz bileşimi de kritik bir parametre olup, örneğin Fe–Mn alaşımlarında ϵ -martensit fazları östenitik γ -fazlara göre daha hızlı bozunurken; magnezyum alaşımlarında Mg_2Ca veya $Mg_{17}Sr_2$ gibi ikincil fazlar galvanik çiftler oluşturarak lokal korozyonu hızlandırabilmektedir.

Çevresel faktörler de bozunma kinetiği üzerinde önemli etkilere sahiptir. pH değeri, iyon konsantrasyonu, protein adsorpsiyonu ve vücut sıvılarının akış dinamiği, in vivo bozunma davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Canlı ortamın dinamik yapısı; mekanik yükleme, hücresel aktivite ve lokal kimyasal değişimler nedeniyle uzun dönemli bozunma davranışının tahmin edilmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle, statik in vitro deneyler çoğu zaman in vivo koşullarda gözlenen bozunma hızlarını olduğundan düşük tahmin etmektedir.

Eklemeli imalat sürecinin kendisi de bozunma davranışını etkileyen ek değişkenler ortaya koymaktadır. Özellikle SLE işlem parametreleri, mikro yapı ve artık gerilmeler üzerinde belirleyici olmakta ve bu durum korozyon hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Yüksek soğuma hızları, ince taneli ve yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip yapılar oluşturarak bozunmayı hızlandırabilirken; proses kaynaklı porozite, lokal korozyon odaklarının oluşmasına neden olabilmektedir (Jana et al., 2022; Kabir et al., 2021; Kawamura et al., 2020; Li et al., 2018; Pogorielov et al., 2017).

Üretimden Kaynaklanan Sorunlar

Biyobozunur metallerin eklemeli imalatı, çeşitli teknolojik zorlukları da beraberinde getirmektedir. Magnezyum ve çinkonun yüksek reaktivitesi, bu malzemeler için özel depolama koşullarını ve SLE sistemlerinde yapısal bazı modifikasyonları gerekli kılmaktadır. Lazer etkileşimi sırasında meydana gelen malzeme buharlaşması, duman ve yoğunlaşma oluşumuna neden olarak lazer optiklerinin kirlenmesine ve proses verimliliğinin azalmasına yol açmaktadır. Ayrıca, SLE sürecine özgü hızlı soğuma koşulları artık gerilmelerin oluşmasına neden olmakta; bu durum parça deformasyonu ve mekanik dayanımda düşüş ile sonuçlanabilmektedir (Esmaily et al., 2020; Manjhi et al., 2024).

Korozyon Yorulması ve Gerilme Korozyonu Çatlağı

Döngüsel yükler ile aşındırıcı ortamın birleşimi, biyobozunur implantlarda korozyon yorulması ve gerilmeli korozyon çatlaması riskini ortaya çıkarır. Bu durum özellikle döngüsel yük altında çalışan implantlar (örneğin kemik plakları, vidalar, kardiyovasküler stentler) için kritik öneme sahiptir. Yapılan çalışmalar, biyobozunur implantlar için geliştirilen ZX50 gibi Al içermeyen Mg alaşımlarının, 10^{-7} s^{-1} gerinim hızında yapay vücut sıvısı ortamında gerilmeli korozyon çatlamasına duyarlı olduğunu ve bunun sünekliğin ciddi biçimde azalmasına yol açtığını göstermiştir (havada %21 iken yapay vücut sıvısında %3,8'e düşmektedir) (Jafari et al., 2015).

Çinko alaşımları ise özellikle klorürlerin varlığında gerilme korozyonu çatlağına karşı artan bir hassasiyet göstermekte olup, uzun süreli kullanım için implant tasarımında bu durumun özel olarak dikkate alınmasını gerektirmektedir (Singh Raman et al., 2023).

Sonuç

Bu çalışmada Mg, Fe ve Zn tabanlı biyobozunur metallerin eklemeli imalatındaki mevcut araştırma durumu incelenmiştir. SLE, karmaşık geometrilerin ve gözenekli yapıların klinik gereksinimlere göre hassas şekilde üretilebilmesi nedeniyle biyobozunur metal implantlar için en uygun yöntem olarak öne çıkmaktadır. Ancak Eİ ile üretilen implantların oluşum kalitesi ve klinik performansı; malzeme, tasarım ve işlem parametrelerinin birlikte optimizasyonuna bağlıdır.

Geleneksel üretime kıyasla Eİ'de malzeme–tasarım–işlem entegrasyonu çok daha belirgindir. Son yıllarda önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen, biyobozunur metallerin Eİ ile üretimi halen erken gelişim aşamasındadır ve klinik uygulamalara geçiş için kapsamlı çalışmalara ihtiyaç vardır. Malzeme açısından, toz kalitesi

SLE sürecini ve elde edilen özellikleri doğrudan etkilemektedir. Literatürde incelenen biyobozunur alaşım tozları sınırlıdır; özellikle Mg için WE43 öne çıkarken, Fe ve Zn alaşımları için alaşım tasarımı ve toz üretimi konusunda daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Yapısal tasarımda, ortopedik uygulamalar için gözenekli iskele yapıları mekanik ve biyolojik gereksinimleri dengelemesi açısından önerilmektedir. Ancak biyobozunma ve doku oluşumu nedeniyle başlangıçtaki optimum tasarım zamanla değişmekte, bu da performansın öngörülmesini zorlaştırmaktadır. Özellikle Mg esaslı metallerde yüksek özgül yüzey alanı hızlı bozunmaya yol açabilmektedir; bu nedenle gradyan yapılar, malzeme tasarımı ve yüzey modifikasyonları gerekli olabilir.

İşlem açısından, SLE sürecinde lazer enerjisi ve tarama stratejilerinin hassas kontrolü kritik öneme sahiptir. Uygun olmayan parametreler gözeneklilik, ergime eksikliği, artık gerilmeler ve deformasyon gibi kusurlara yol açmaktadır. Mekanik özellikler çoğu durumda geleneksel yöntemlerle üretilen malzemelere yakın olsa da, parça içinde konumsal farklılıklar görülebilmektedir. Son olarak, mevcut biyolojik performans verileri ağırlıklı olarak in vitro testlere dayanmaktadır; klinik uygulamalar için in vivo çalışmaların artırılması gerekmektedir.

Kaynakça

- Aufa, A. N., Hassan, M. Z., & Ismail, Z. (2022). Recent advances in Ti-6Al-4V additively manufactured by selective laser melting for biomedical implants: Prospect development. *Journal of Alloys and Compounds*, 896, 163072. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163072>
- Bai, J., Wang, Q., Men, Z., Chen, W., Huang, H., Ji, C., Li, Y., Wang, L., Zhu, L., Li, K., & Su, Q. (2024). Generation Mechanism of Anisotropy in Mechanical Properties of WE43 Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. *Micromachines*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/mi15080976>
- Bao, G., Fan, Q., Ge, D., Sun, M., Guo, H., Xia, D., Liu, Y., Liu, J., Wu, S., He, B., & Zheng, Y. (2019). In vitro and in vivo studies on magnesium alloys to evaluate the feasibility of their use in obstetrics and gynecology. *Acta Biomaterialia*, 97, 623–636. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.08.001>
- Choi, J.-P., Shin, G.-H., Lee, H.-S., Yang, D.-Y., Yang, S., Lee, C.-W., Brochu, M., & Yu, J.-H. (2017). Evaluation of Powder Layer Density for the Selective Laser Melting (SLM) Process. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 58(2), 294–297. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2016364>
- Deng, Q., Wu, Y., Luo, Y., Su, N., Xue, X., Chang, Z., Wu, Q., Xue, Y., & Peng, L. (2020). Fabrication of high-strength Mg-Gd-Zn-Zr alloy via selective laser melting. *Materials Characterization*, 165, 110377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110377>
- Esmaily, M., Zeng, Z., Mortazavi, A. N., Gullino, A., Choudhary, S., Derra, T., Benn, F., D’Elia, F., Mütter, M., Thomas, S., Huang,

- A., Allanore, A., Kopp, A., & Birbilis, N. (2020). A detailed microstructural and corrosion analysis of magnesium alloy WE43 manufactured by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 35, 101321. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101321>
- Ewald, F. C., Brenne, F., Gustmann, T., Vollmer, M., Krooß, P., & Niendorf, T. (2021). Laser powder bed fusion processing of Fe-Mn-Al-Ni shape memory alloy—on the effect of elevated platform temperatures. *Metals*, 11(2), 1–9. <https://doi.org/10.3390/met11020185>
- Gajanan, M. N., Narendranath, S., & Satheesh Kumar, S. S. (2019). Effect of grain refinement on mechanical and corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy processed by ECAE. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 591(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/591/1/012015>
- Han, H.-S., Minghui, Y., Seok, H.-K., Byun, J.-Y., Cha, P.-R., Yang, S.-J., & Kim, Y. C. (2013). The modification of microstructure to improve the biodegradation and mechanical properties of a biodegradable Mg alloy. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 20, 54–60. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.12.007>
- Jafari, S., Harandi, S. E., & Singh Raman, R. K. (2015). A Review of Stress-Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue of Magnesium Alloys for Biodegradable Implant Applications. *JOM*, 67(5), 1143–1153. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1366-z>
- Jana, A., Das, M., & Balla, V. K. (2022). In vitro and in vivo degradation assessment and preventive measures of biodegradable Mg alloys for biomedical applications. In *Journal of Biomedical Materials Research - Part A* (Vol. 110,

- Issue 2, pp. 462–487). John Wiley and Sons Inc.
<https://doi.org/10.1002/jbm.a.37297>
- Jo, Ji-Hoon, Hong, Ji-Yeon, Shin, Kwang-Seon, Kim, Hyoun-Ee, & Koh, Young-Hag. (2011). Enhancing biocompatibility and corrosion resistance of Mg implants via surface treatments. *Journal of Biomaterials Applications*, 27(4), 469–476.
<https://doi.org/10.1177/0885328211412633>
- John, E., Laskow, T. C., Buchser, W. J., Pitt, B. R., Basse, P. H., Butterfield, L. H., Kalinski, P., & Lotze, M. T. (2010). Zinc in innate and adaptive tumor immunity. *Journal of Translational Medicine*, 8(1), 118. <https://doi.org/10.1186/1479-5876-8-118>
- Kabir, H., Munir, K., Wen, C., & Li, Y. (2021). Recent research and progress of biodegradable zinc alloys and composites for biomedical applications: Biomechanical and biocorrosion perspectives. *Bioactive Materials*, 6(3), 836–879.
<https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.09.013>
- Kawamura, N., Nakao, Y., Ishikawa, R., Tsuchida, D., & Iijima, M. (2020). Degradation and biocompatibility of AZ31 magnesium alloy implants in vitro and in vivo: A micro-computed tomography study in rats. *Materials*, 13(2).
<https://doi.org/10.3390/ma13020473>
- Kraner, J., Medved, J., Godec, M., & Paulin, I. (2021). Thermodynamic behavior of Fe-Mn and Fe-Mn-Ag powder mixtures during selective laser melting. *Metals*, 11(2), 1–12.
<https://doi.org/10.3390/met11020234>
- Kruth, J. P., Froyen, L., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P., Rombouts, M., & Lauwers, B. (2004). Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1), 616–622.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051>

- Li, Y., Jahr, H., Lietaert, K., Pavanram, P., Yilmaz, A., Fockaert, L. I., Leeftang, M. A., Pouran, B., Gonzalez-Garcia, Y., Weinans, H., Mol, J. M. C., Zhou, J., & Zadpoor, A. A. (2018). Additively manufactured biodegradable porous iron. *Acta Biomaterialia*, 77, 380–393. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.07.011>
- Liu, S., & Guo, H. (2020). A review of SLMed magnesium alloys: Processing, properties, alloying elements and postprocessing. In *Metals* (Vol. 10, Issue 8, pp. 1–48). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/met10081073>
- Liu, S., Yang, W., Shi, X., Li, B., Duan, S., Guo, H., & Guo, J. (2019). Influence of laser process parameters on the densification, microstructure, and mechanical properties of a selective laser melted AZ61 magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 808, 151160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.261>
- Manjhi, S. K., Sekar, P., Bontha, S., & Balan, A. S. S. (2024). Additive manufacturing of magnesium alloys: Characterization and post-processing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 7(1), 184–213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.06.004>
- Mouzou, E., Paternoster, C., Tolouei, R., Purnama, A., Chevallier, P., Dubé, D., Prima, F., & Mantovani, D. (2016). In vitro degradation behavior of Fe–20Mn–1.2C alloy in three different pseudo-physiological solutions. *Materials Science and Engineering: C*, 61, 564–573. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.12.092>

- Paim, T. C., Wermuth, D. P., Bertaco, I., Zanatelli, C., Naasani, L. I. S., Slaviero, M., Driemeier, D., Schaeffer, L., & Wink, M. R. (2020). Evaluation of in vitro and in vivo biocompatibility of iron produced by powder metallurgy. *Materials Science and Engineering: C*, 115, 111129. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111129>
- Palanivel, S., Nelaturu, P., Glass, B., & Mishra, R. S. (2015). Friction stir additive manufacturing for high structural performance through microstructural control in an Mg based WE43 alloy. *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 934–952. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.082>
- Pogorielov, M., Husak, E., Solodivnik, A., & Zhdanov, S. (2017). Magnesium-based biodegradable alloys: Degradation, application, and alloying elements. *Interventional Medicine and Applied Science Interventional Medicine and Applied Science*, 9(1), 27–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1556/1646.9.2017.1.04>
- Pola, A., Tocci, M., & Goodwin, F. E. (2020). Review of microstructures and properties of zinc alloys. In *Metals* (Vol. 10, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/met10020253>
- Qin, Y., Wen, P., Guo, H., Xia, D., Zheng, Y., Jauer, L., Poprawe, R., Voshage, M., & Schleifenbaum, J. H. (2019). Additive manufacturing of biodegradable metals: Current research status and future perspectives. *Acta Biomaterialia*, 98, 3–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.04.046>
- Qin, Y., Wen, P., Xia, D., Guo, H., Voshage, M., Jauer, L., Zheng, Y., Schleifenbaum, J. H., & Tian, Y. (2020). Effect of grain structure on the mechanical properties and in vitro corrosion behavior of additively manufactured pure Zn. *Additive*

- Manufacturing*, 33, 101134.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101134>
- Rabeeh, V. P. M., & Hanas, T. (n.d.). Progress in manufacturing and processing of degradable Fe-based implants: a review. *Progress in Biomaterials*, 11(2 (June 2022)).
<https://doi.org/10.1007/s40204-022-00189-4>
- Sefene, E. M. (2022). State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review. In *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 63, pp. 250–274). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.002>
- Seitz, J. M., Collier, K., Wulf, E., Bormann, D., Angrisani, N., Meyer-Lindenberg, A., & Bach, F. W. (2011). The effect of different sterilization methods on the mechanical strength of magnesium based implant materials. *Advanced Engineering Materials*, 13(12), 1146–1151.
<https://doi.org/10.1002/adem.201100074>
- Singh Raman, R. K., Wen, C., & Löffler, J. F. (2023). Human Body-Fluid-Assisted Fracture of Zinc Alloys as Biodegradable Temporary Implants: Challenges, Research Needs and Way Forward. In *Materials* (Vol. 16, Issue 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
<https://doi.org/10.3390/ma16144984>
- Soni, N., Renna, G., & Leo, P. (2024). Advancements in Metal Processing Additive Technologies: Selective Laser Melting (SLM). In *Metals* (Vol. 14, Issue 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
<https://doi.org/10.3390/met14091081>
- Venezuela, J., & Dargusch, M. S. (2020). Addressing the slow corrosion rate of biodegradable Fe-Mn: Current approaches and future trends. *Current Opinion in Solid State and Materials*

- Science*, 24(3), 100822.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cossms.2020.100822>
- Wadge, M. D., McGuire, J., Hanby, B. V. T., Felfel, R. M., Ahmed, I., & Grant, D. M. (2021). Tailoring the degradation rate of magnesium through biomedical nano-porous titanate coatings. *Journal of Magnesium and Alloys*, 9(1), 336–350.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.07.001>
- Xie, T., Liu, J., Xiao, L., Xie, Y., Qian, S., Dai, Y., & Wu, J. (2024). Additive manufacturing of Fe–Mn–Al–C lightweight steel by laser powder bed fusion: The role of laser scanning speed on forming quality, microstructure and properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 33, 6610–6621.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.254>
- Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. In *Applied Physics Reviews* (Vol. 2, Issue 4). American Institute of Physics Inc.
<https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- Zhang, W., Wang, L., Feng, Z., & Chen, Y. (2020). Research progress on selective laser melting (SLM) of magnesium alloys: A review. *Optik*, 207, 163842.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163842>
- Zheng, Y. F., Gu, X. N., & Witte, F. (2014). Biodegradable metals. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 77, 1–34.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.01.001>

BÖLÜM 7

ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLMİŞ SÜREKLİ FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT KAFES YAPILARIN MEKANİK İNCELENMESİ

Gamze SAKAOĞLU ¹
Farshıd KHOSRAVI ²

Giriş

Polimer esaslı kafes yapılar, sistematik tekrar eden hücrelerden oluşan hafif ve dayanıklı mimarileriyle doğal yapıların mekanik prensiplerini taklit eden mekanik metamaterlardır (Bayat & ark., 2025; Zhao & ark., 2025). Bu yapılar, aerodinamik ve ısı transferi gerektiren uzay-uzay uygulamalarından, biyomalzeme iskeletlerine ve spor koruyucularına kadar birçok alanda yüksek özgül mukavemet ve enerji soğurma avantajı sağlar (Bayat & ark., 2025; Dos Santos & ark., 2025). Örneğin, literatürde polimer kafes yapılar hafif yapıları ve yüksek enerjisoğurma kapasiteleri nedeniyle çarpışma koruması ve zırh gibi uygulamalarda incelenmiştir (Bayat & ark., 2025; Chan & ark., 2025). Ayrıca, ileri imalat yöntemleri (ör. SLA, FDM) karmaşık kafes geometrilerinin üretimine imkân

¹ Bartın Üniversitesi, Mühendislik ve Tasarım Fakültesi, Orcid: 0009-0005-9473-149X

² Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-8866-114X

vererek tasarım seçeneklerini genişletmiştir (Jin & ark., 2024; Wang & ark., 2024). Ancak kafes yapının birim hücresi ve malzeme özelliklerine göre çekme, basma ve burulma davranışları büyük ölçüde değişebilir. Bu nedenle literatürde hem deneysel hem de sayısal çalışmalarla her türlü kafes topolojisinin mekanik performansı (modül, akma dayanımı, çökme modları, spesifik enerji soğurumu vb.) kapsamlı biçimde araştırılmıştır (Al Hassanieh & ark., 2021; Rasović & ark., 2025).

Polimer kafes yapılar, benzer yoğunluktaki katı malzemelere göre yüksek özgül mukavemet ve yüksek spesifik enerji soğurumu sunar (Bayat & ark., 2025; Wang & ark., 2020). Bu özellikler, hafif yapı tasarımında malzeme kullanımını azaltarak yakıt tasarrufu veya konfor gibi avantajlar sağlayabilir (Bayat & ark., 2025; Dos Santos & ark., 2025). Literatürde örnek olarak; hücre yapıların titreşim yalıtımı, ısı akışı kontrolü, akustik yutma ve çarpışma korumasında polimer kafeslerin etkinliği vurgulanmaktadır (Dos Santos & ark., 2025; Rasović & ark., 2025). Uygulama alanları şunlardır: Havacılık ve uzay mühendisliği: Yakıt tasarrufu ve yüksek dayanım gerektiren yapısal bileşenler (ör. yay yapıları, emniyet kafesleri) (Bayat & ark., 2025; Dos Santos & ark., 2025). Otomotiv ve ulaşım: Araç içi çarpma emiciler, motor parçaları, ısı soğutma elemanları (Bayat & ark., 2025; Dos Santos & ark., 2025). Tıbbi implantlar ve biyomalzemeler: Kemik veya doku iskelet replasmanında biyoyoumlu polimer kafesler (Bayat & ark., 2025; Chan & ark., 2025). Spor ve koruyucu donanımlar: Sporcu koruyucu giysilerinde düşme/emniyet ekipmanlarında enerji soğurucu ara katmanlar (Dos Santos & ark., 2025; Chan & ark., 2025). İnşaat ve altyapı: Hafif, darbe emici yapı elemanları, ısı yalıtımlı kireçtaş kafesler, korkuluk.

Bu uygulamalarda malzeme ve geometri tasarımı birlikte uyarlanarak, örneğin mühendislik termoplastik veya fotopolimer bazlı kafeslerin ağırlık ve dayanım dengesi optimize edilebilmektedir (Jin & ark., 2024; Egan & ark., 2022). Ek olarak,

sürekli lif takviyeli polimer kafesler (CFRPLS) gibi hibrit yapılar, normal polimer kafeslerin mekanik performansını daha da iyileştirebilmektedir (Sadeghzadeh & ark., 2025).

Kafes yapıların mekanik davranışı, birim hücre topolojisine (kübik, BCC, dodekahedral, helical, TPMS vb.) ve göreceli yoğunluğuna bağlıdır (Rasović & ark., 2025; Egan & ark., 2022). Örneğin, çekme veya basma testleriyle ölçülen elastik modül ve akma gerilmesi, hem hücre şekli hem de katman kalınlığı/porsitesi tarafından belirlenir (Wang & ark., 2024; Rasović & ark., 2025). Yapılan deneysel çalışmalarda (örn. FDM ile basılmış ASA ve HIPS kafeslerde), farklı hücre geometri değişikliklerinin mukavemet ve rijitliği ciddi şekilde etkilediği gözlenmiştir (Rasović & ark., 2025; Egan & ark., 2022). Ayrıca eğilme ve kayma testleri, kafeslerin yanal stabilitesini ve esneklik yeteneklerini gösterir. Literatürde düzlemsel (plaka tabanlı) kafeslerin burulma ve lokal bükülmeye karşı dirençli olduğu, çubuk (çubuk tabanlı) kafeslerin ise enerjiyi daha fazla soğurduğu, yapılan çoklu testlerle ortaya konmuştur (Al Hassanieh & ark., 2021; Chan & ark., 2025).

Kafeslerin deformasyon modları, yapının gerilme mi yoksa bükülme-dominantı mı olduğuna göre iki ana sınıfa ayrılır (Al Hassanieh & ark., 2021; Chan & ark., 2025). Örneğin, içbükey (auxetik) re-entrant hücreler, dışarı doğru genişleyen negatif Poisson oranı sayesinde darbe emmede etkindir ve çarpma enerjisini kuvvetli şekilde soğurur (Chan & ark., 2025; Al Hassanieh & ark., 2021). Öte yandan, klasik kubik veya dodekahedral kafesler bükülme-dominant olup elastik deformasyon bölgelerinde daha nötr davranış gösterir; bu durum, yüksek uzama öncesi enerji soğurmaya elverişlidir (Chan & ark., 2025; Wang & ark., 2020). Deneysel çalışmalara göre, kafes içindeki gerilme konsantrasyonu köşe ve bağlantı bölgelerinde gerçekleşirken, farklı geometri ve ekstrüzyon parametreleri bu konsantrasyonu değiştirerek çökme/yenilme modlarını değiştirir (Walker & ark., 2025; Rasović & ark., 2025). Sonuçta, kafes yapının

izotrop veya anizotrop davranışları, hücre şekli ve imalat yöneliminden kaynaklanır; bazı çalışmalar yönden bağımlı rijitlik ve mukavemet farkları bildirmiştir (Wang & ark., 2024; Rasović & ark., 2025).

Güncel literatürde polimer kafesler üzerine hem deneysel testler (çekme, basma, eğilme, çarpışma testleri) hem de sayısal modelleme (FEA, homogenizasyon, optimizasyon) çalışmaları yer almaktadır. Örneğin Wang ve arkadaşları (2024), stereolitografi ile basılmış TPMS kafeslerde mekanik performansın simülasyon ve deneysel analizini gerçekleştirmiştir (Wang & ark., 2024). Benzer şekilde, öncelikle sayısal modellere dayanan tasarım kararları, ardından 3D baskı ile deney doğrulaması yapan çok sayıda çalışma mevcuttur (Walker & ark., 2025; Sadeghzadeh & ark., 2025). Bu çalışmalar, unit-cell boyutu, taban malzeme sertliği, bağlaştırıcı tabaka adımı gibi faktörlerin kafes mukavemetini nasıl etkilediğini göstermektedir (Egan & ark., 2022; Walker & ark., 2025). Ayrıca, mikrotomografi (μ -CT) temelli FEA yaklaşımları, basılan polimer kafeslerin üretim hatalarını ve gözenek sapmalarını tespit ederek gerçek mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemektedir (Walker & ark., 2025).

Tüm bu çalışmalar ışığında, polisüre gibi termoplastik veya fotopolimer kafeslerin çekme ve basma dayanımı, göz ile görülemeyen imalat kusurlarına rağmen CAD tasarıma yakın gelmektedir (Walker & ark., 2025; Wang & ark., 2024). Bu bağlamda, literatürdeki bulgular polimer kafeslerin yüksek oranda özelleştirilebilir olduğu, gerilme-yuvarlanma profilleri kolayca ayarlanabildiği yönündedir (Egan & ark., 2022; Walker & ark., 2025).

Genel olarak, güncel literatür polimer esaslı kafes yapıların hafiflik, enerji soğurma, yüksek özgül mukavemet gibi üstünlüklerinin mekanik karşılıklarını doğrulamaktadır (Bayat & ark., 2025; Wang & ark., 2020). Kafes geometrisinin ve üretim

yöntemlerinin mekanik davranışı belirlemede kritik rol oynadığı vurgulanmaktadır (Rasović & ark., 2025; Egan & ark., 2022). Bu nedenle araştırmalar, farklı kafes topolojilerinin deneysel karşılaştırmaları ve simülasyon modelleriyle birleştirilerek geniş bir çerçevede incelenmiştir (Al Hassanieh & ark., 2021; Sadeghzadeh & ark., 2025). İlerleyen çalışmalarda, çok katmanlı veya karma kafes konstrüksiyonların performansının optimize edilmesi ve gerçek uygulama gereksinimleri doğrultusunda malzeme seçimlerinin detaylandırılması hedeflenmektedir.

Materyal ve Metot

Bu çalışmada Markforged Desktop Serisi Mark Two cihazı kullanılmıştır. Bu cihazlar, endüstriyel kalitede kompozit lif takviyeli parçalar üretebilmektedir.

- **Onyx Filament:** Naylon 6 matris içerisinde kıyılmış karbon fiber içeren mühendislik plastiği
- **Sürekli Karbon Fiber Takviyesi:** Her katmanda 2 tur boyunca döngüsel olarak yerleştirilmiş, yüksek rijitlik kazandıran fiber tabakalar

Numuneler %37 doluluk oranıyla basılmış olup, geometrik yapısı korunarak karbon fiber takviyesi ile güçlendirilmiştir

Bu projede dört farklı kafes geometrisi (A, B, C ve D numuneleri), Markforged Onyx kompozit malzeme kullanılarak üretilmiş ve çekme–basma testleri ile mekanik olarak karakterize edilmiştir.

Numuneler aşağıdaki dört temel kafes tipinden oluşmaktadır:

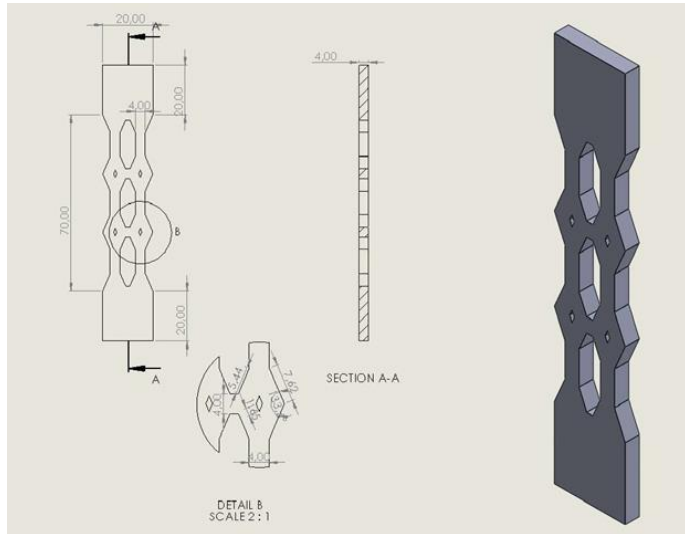
A tipi: Altıgen tabanlı dairesel hücre kafesi (şekil 1)

B tipi: Üçgen açıklıklı çift yönlü sıkıştırılmış kafes (şekil 2)

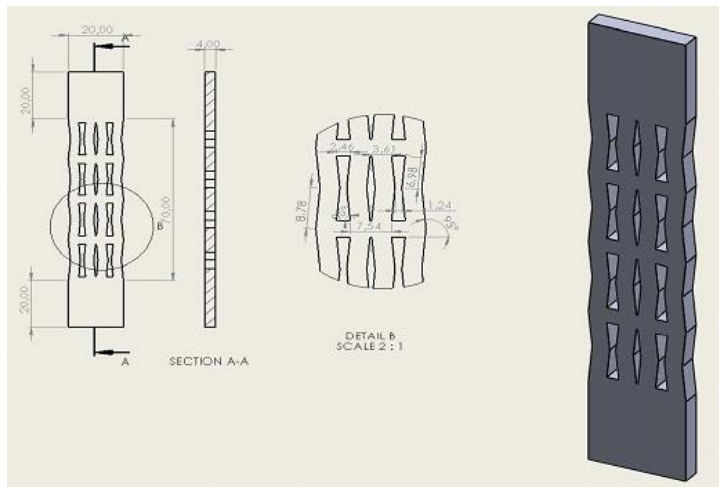
C tipi: İnce dikey çok yollu fiber benzeri hücresel yapı (şekil 3)

D tipi: Düğüm noktaları belirgin çokgen kafes (Şekil 4)

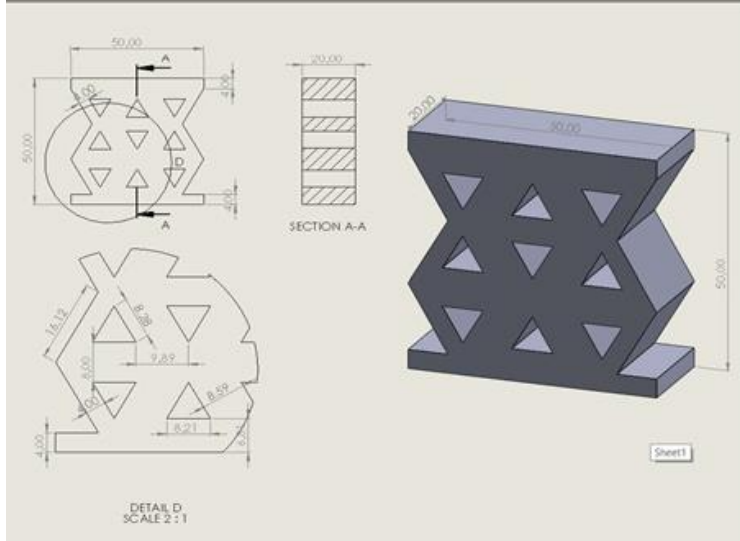
Şekil 1. A Numunesi Geometrisi



Şekil 2. B Numunesi Geometrisi

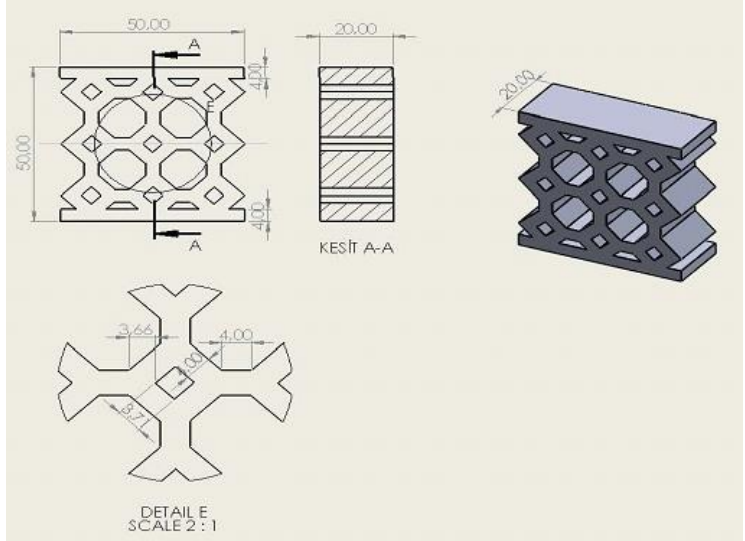


Şekil 3. C Numunesi Geometrisi

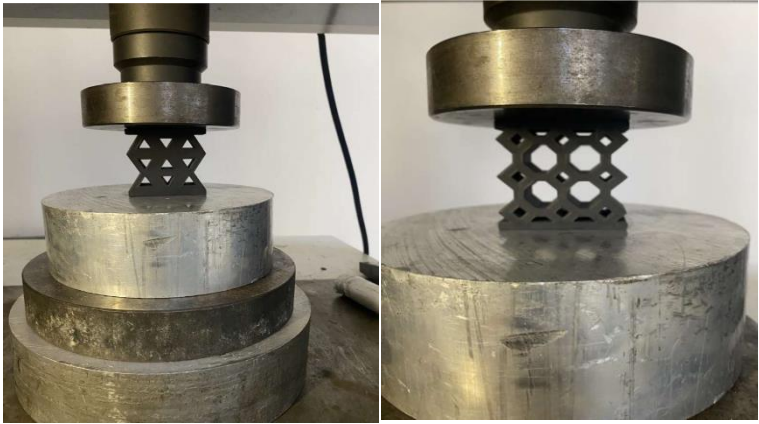


3B Yazıcı kullanarak üretilen numunelerin çekme davranışını incelemek için, 100kN kapasiteli SHIMADZU makinesi kullanılmıştır. Uygulana kuvvet, yer değiştirme kontrollü şeklinde ve yükleme hızı 5 mm/dk olarak belirlenmiştir. Şekil 5 ve 6'da sırasıyla çekme ve basınç test düzenekleri gösterilmiştir. Her geometri için çekme ve basınç testlerinde üç tekrar yapılmıştır.

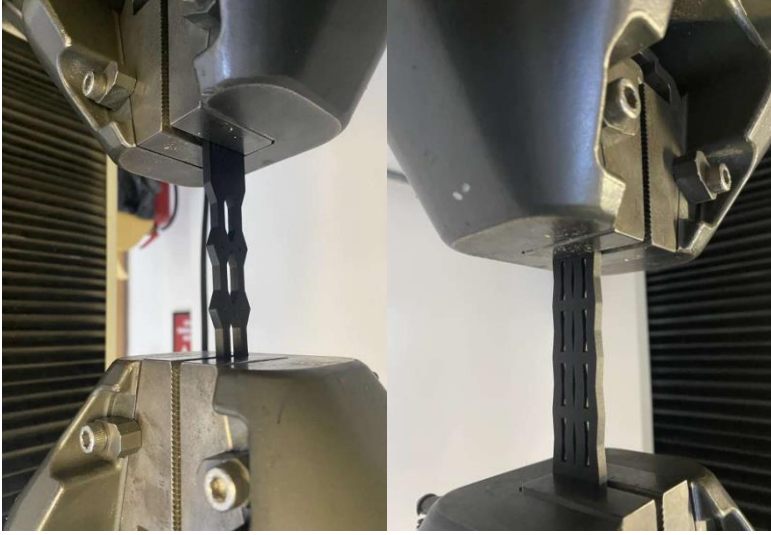
Şekil 4. D Numunesi Geometrisi



Şekil 5. Çekme testi düzeneği



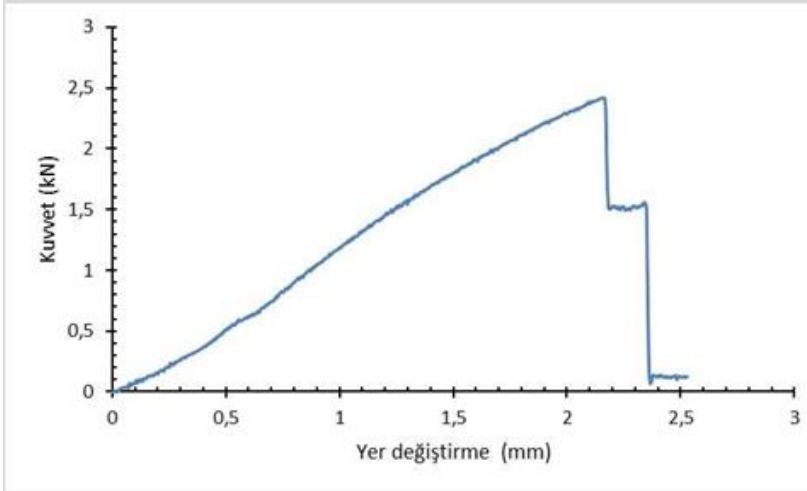
Şekil 6. Basınç testi düzeneği



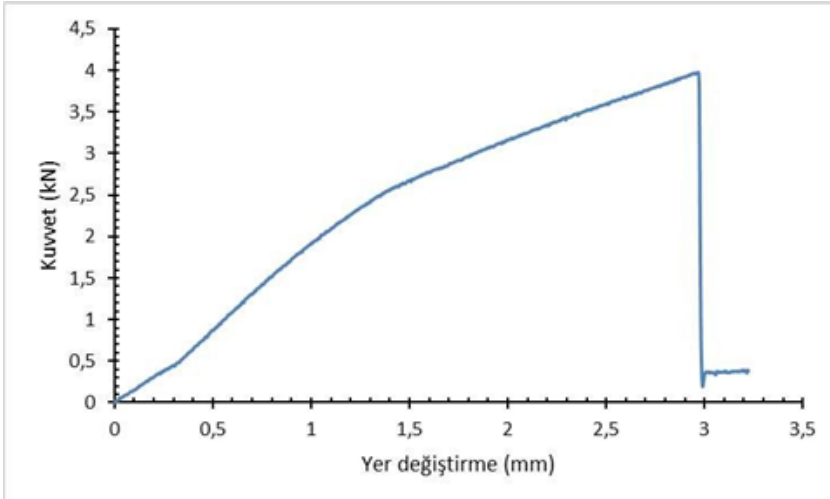
Sonuçlar

Standart numunelerin çekme testinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri 9 ve 10'da gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi A numunesinin çekme dayanımı B numunesine göre daha fazladır. Testlerden elde edilen sonuçlara göre maksimum çekme dayanımı A numunesi için $2,45 \pm 0,13$ kN'dur. B numunesi için maksimum çekme dayanımı ortalama $4,15 \pm 0,17$ kN'dur. Sonuçlara göre A numunesinin çekme dayanımı B numunesine göre %70 daha fazladır.

Şekil 7. A Numunesi Çekme Eğrisi



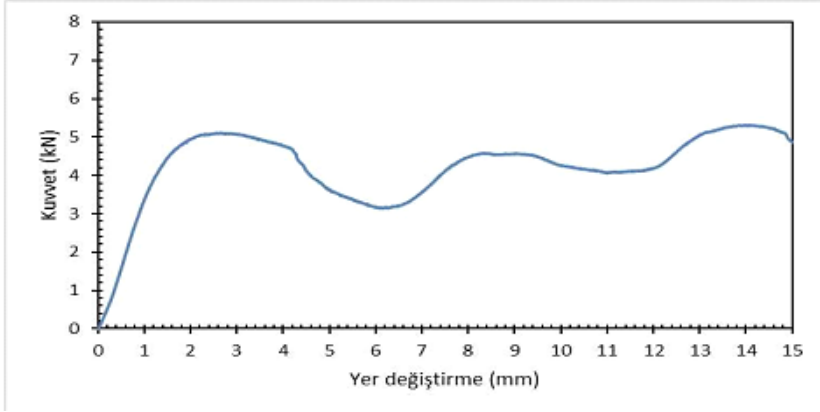
Şekil 8. B Numunesi Çekme Eğrisi



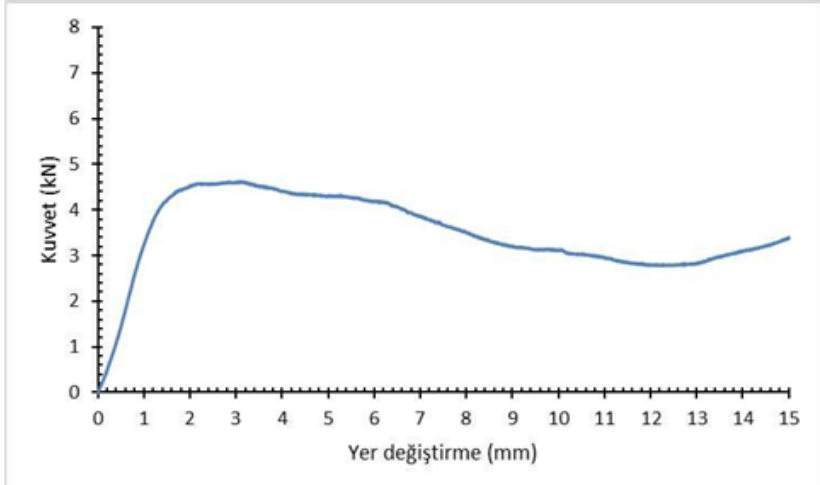
Standart numunelerin basınç testlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri şekil 9 ve 10 'da verilmiştir. Sonuçlara göre C numunesinin çekme dayanımı D numunesine göre daha fazladır. Testlerden elde edilen sonuçlara göre maksimum basınç dayanımı C

numunesi için $5,3\pm0,2$ kN'dur. D numunesi için maksimum çekme dayanımı ortalama $4,7\pm0,3$ kN'dur. Sonuçlara göre C numunesinin çekme dayanımı D numunesine göre %13 daha fazladır.

Şekil 9. C Numunesi Basma Eğrisi



Şekil 10. D Numunesi Basma Eğrisi



Bu çalışma TÜBİTAK 2209/A projesi ile desteklenmiştir.

Kaynakça

Al Hassanieh, S., Alhantoobi, A., Khan, K. A. ve Khan, M. A. (2021). *Mechanical Properties and Energy Absorption Characteristics of Additively Manufactured Lightweight Novel Re-Entrant Plate-Based Lattice Structures*. Polymers, 13(22), 3882. <https://doi.org/10.3390/polym13223882>

Bayat, S., Farjood, A. ve Seyedraoufi, Z.-S. (2025). *Effect of Strut Shape on the Mechanical Behavior and Energy Absorption Performance of Periodic Lattices*. Scientific Reports, 15, 41929. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-25887-4>

Chan, M.-K., Hung, S.-C., Yick, K.-L., Sun, Y., Yip, J. ve Ng, S.-P. (2025). *Impact Absorption Behaviour of 3D-Printed Lattice Structures for Sportswear Applications*. Polymers, 17(19), 2611. <https://doi.org/10.3390/polym17192611>

Dos Santos, A. P., Correa, G., et al. (2025). *Size Effects in 3D-Printed Polymeric Lattices under Three-Point Bending*. European Journal of Mechanics – A/Solids, 115, 104957. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2024.104957>

Egan, P. F., Khatri, N. R., Parab, M. A. ve Arefin, A. M. E. (2022). *Mechanics of 3D-Printed Polymer Lattices with Varied Design and Processing Strategies*. Polymers, 14(24), 5515. <https://doi.org/10.3390/polym14245515>

Jin, F., Lu, W., An, X., Zhu, H. ve Wang, J. (2024). *Mechanical Properties and Compression Performance of 3D-Printed HIPS Polymer Lattice Structure*. Manufacturing Technology, 24(3), 378–384. DOI: 10.21062/mft.2024.054

Sadeghzadeh, M., Dadashi, A. ve Gharehbaghi, H. (2025). *Mechanical Behavior, Process Innovations, and Future Directions of 3D-Printed Continuous Fiber-Reinforced*

Polymeric Lattice Structures: A Comprehensive Review. Materials & Design, 260, 114970. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114970>

Rasović, N., Krešić, I. ve Kaljun, J. (2025). *Mechanical Uniaxial Compression of 3D-Printed Non-Periodic ASA Lattice Structures Using Semi-Controlled Design Models.* Polymers, 17(20), 2775. <https://doi.org/10.3390/polym17202775>

Walker, O., Roland, T., Favier, D., Egelé, A., et al. (2025). *Mechanical Properties of Architected Polymer Lattice Materials: A Comparative Study of Additive Manufacturing and CAD Using FEM and μ -CT.* Advanced Functional Materials. <https://doi.org/10.1002/adfm.202512520>

Wang, Z., Xu, M., Du, J. ve Jin, Y. (2024). *Experimental and Numerical Investigation of Polymer-Based 3D-Printed Lattice Structures with Largely Tunable Mechanical Properties Based on Triply Periodic Minimal Surface.* Polymers, 16(5), 711. <https://doi.org/10.3390/polym16050711>

Wang, X., Rastegarzadeh, S., Pan, Y. ve Huang, J. (2020). *Compressive Behavior and Energy Absorption of Stereolithography-Printed Lightweight Novel Composite Lattice Structures.* Frontiers of Mechanical Engineering, 15, 319–327. <https://doi.org/10.1007/s11465-019-0608-3>

Zhao, X., Wang, X. ve Shang, Y. (2025). *Mechanical Properties and Energy Absorption Characteristics of a Combined Gradient BCC Lattice Structure: A Numerical Study.* Materials, 18(15), 3652. <https://doi.org/10.3390/ma18153652>

BÖLÜM 8

SÜRDÜRÜLEBİLİR KOMPOZİT MALZEMELER İÇİN DOĞAL FİBERLER

MEHMET ÇAĞRI TÜZEMEN¹

Giriş

Birbirlerinin zayıf yönlerini düzelterek üstün özellikler elde etmek amacı ile bir araya getirilmiş, değişik fazlardan oluşan malzemelere kompozit malzemeler denir. Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içerisinde çözünmezler. Ancak çoğunluğu metalik sistemlerde olmak üzere; düşük oranlarda bile olsa, bir miktar çözünme ve bileşenler arasında bazı ara yüzey reaksiyonları görülebilmektedir.

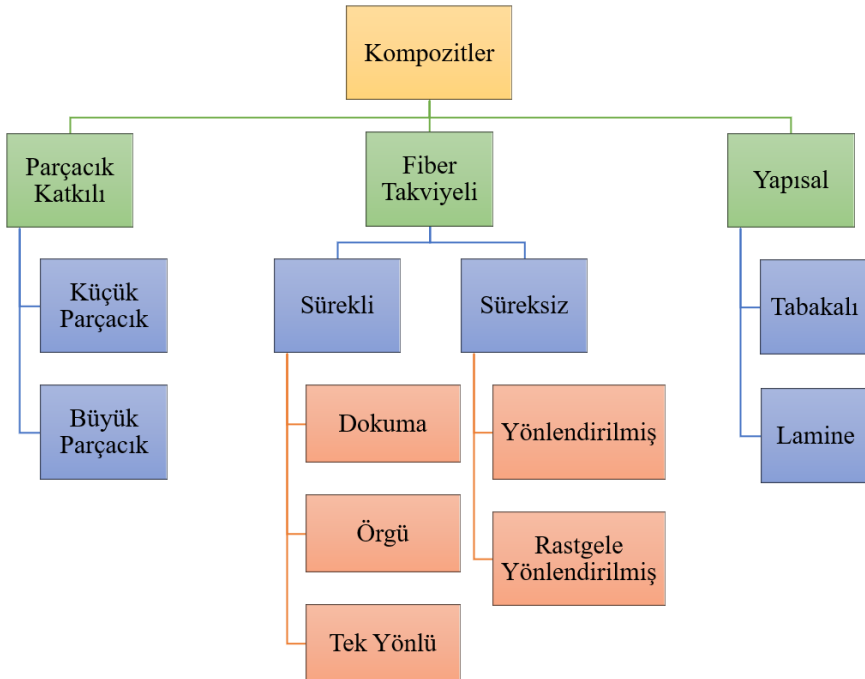
Kompozitlerde üç çeşit matris malzemesi kullanılır: metal, seramik ve polimer. Polimer matrisler termoset, termoplastik veya biopolimer olabilirler. Kompozit malzemelerde takviye türleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Parçacık katkılı kompozitler parçacık boyutuna göre küçük parçacık takviyeli ve büyük parçacık takviyeli olarak ikiye ayrılmaktadır. Fiber takviyede ise fiberlerin uzunluğuna göre sürekli ve süreksiz fiber takviyeli kompozitler olarak ikiye ayrılır. Süreksiz fiber takviyeli kompozitlerde fiberlerin yönlendirilme

¹ Doç. Dr., Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-1746-2864

durumlarına göre yönlendirilmiş veya rastgele yönlendirilmiş olarak ikiye ayrılmaktadır. Yapısal kompozitler ise tabakalı ve lamine olarak ikiye ayrılabilir.

İmalat sanayisinde malzemeler, saf metallere alaşımlara ve kompozitlere doğru evrilmiştir. Bunun nedeni modern ürünlerin beklentilerini karşılamada saf metallerin yetersiz kalmasıdır. Kompozitler, yüksek özgül mukavemet, güçlü sönümleme kapasitesi ve hafiflik gibi avantajları sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozitler, avantajlı mekanik özellikleri ve hafiflikleri nedeniyle, en verimli ve en ucuz ürünlere doğru sürekli olarak evrilmektedir. Otomobil, havacılık, denizcilik ve spor malzemeleri gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Şekil 1 Kompozit malzemelerde takviye türleri



Kaynak: (Suriani et al., 2021)

Petrol bazlı plastiklerin aşırı tüketimi doğal kaynakların ve çöp alanlarının ciddi şekilde tükenmesine neden olmaktadır. Çevre bilincinin artması ve doğal kaynakların tükenmesi gibi tehditler, sürdürülebilir kalkınma kavramının önem kazanmasına neden olmuştur. Bu nedenle, çevre dostu eko-malzeme ve biyobozunur kompozitlerin geliştirilmesi üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Doğal fiberler dolgu veya takviye olarak kullanılan biyo-kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında geliştirilmesi ve kullanılması eğilimi artmaktadır. Doğal fiberlerle güçlendirilmiş kompozitler, düşük yoğunluk, yenilenebilirlik ve biyobozunurluk gibi özellikleri ile dikkat çekmektedir. Çevresel mevzuat ve tüketici talepleri, üreticiler ve bilim insanları üzerinde çevre dostu ve sürdürülebilir malzemeler geliştirmeleri için baskı oluşturmaktadır. Bu malzemeler, petrol bazlı ürünlerin yerini alarak doğal kaynakların korunmasına ve çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olmaktadır.

Son yıllarda doğal fiberler polimer matrisli kompozitlerde öne çıkmaktadır. Doğada bol miktarda bulunması nedeniyle düşük maliyetle elde edilebilmektedir. Çevre dostu, yenilenebilir ve uygun maliyetli malzemelere olan ihtiyaç nedeniyle takviye elemanı olarak doğal fiberlerin kullanımı yıllar içinde yaygınlaşmıştır. Cam fiber kompozitlerle karşılaştırıldığında doğal fiber takviyeli kompozitler, maliyeti düşük, işlenmesi kolay, biyolojik olarak parçalanabilir, toksisitesi olmayan, aşındırıcı olmayan ve hafif yapısı nedeniyle daha avantajlıdır (Suriani et al., 2021).

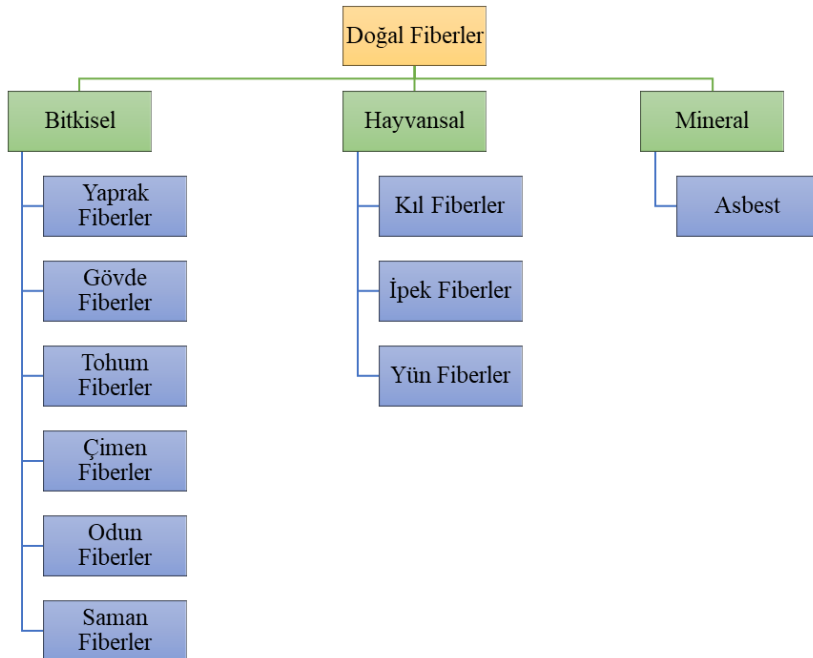
Doğal Fiberlerin Sınıflandırılması

Doğal fiberler, mineral bazlı (asbest gibi), bitki bazlı (pamuk, sisal, kenevir, keten, jüt ve hindistan cevizi fiberi gibi) veya hayvan bazlı (yün, tiftik, kuş tüyü ve ipek gibi) olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2). Saç, ipek ve yün gibi hayvan fiberleri proteinlerden oluşurken, tüm bitki fiberleri selülozdan oluşur. Gövde, yaprak,

meyve, tohum, odun, tahıl sapı ve çeşitli ot fiberleri bitki fiberlerine örnektir. Doğal fiberler grubu ayrıca şeker kamışı üretiminden elde edilen şeker kamışı fiberi ve pirinç kabuklarının yakılmasından elde edilen pirinç kabuğu gibi tarımsal atıkları da içerir.

Petrolün sürdürülemez kullanımı, çevre sorunlarına olan kamuoyu ilgisinin ve anlayışının artması ve yeni çevre düzenlemeleri, bu çevre dostu doğal malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur. Doğal fiber, birçok açıdan sentetik fiberlerden daha üstündür ve daha çevre dostu malzemelerden biri olarak kabul edilir (Ahmed et al., 2025). Özellikle, doğal fiberler sentetik fiberlerden daha geri dönüştürülebilir olması ve kaynakları sentetik fiberlerin aksine sınırsızdır. Bununla birlikte, sentetik fiberler doğal fiberlerden daha iyi mekanik özelliklere sahiptir, ancak neme ve ısıya daha az duyarlıdırlar.

Şekil 2 Doğal fiberlerin sınıflandırılması

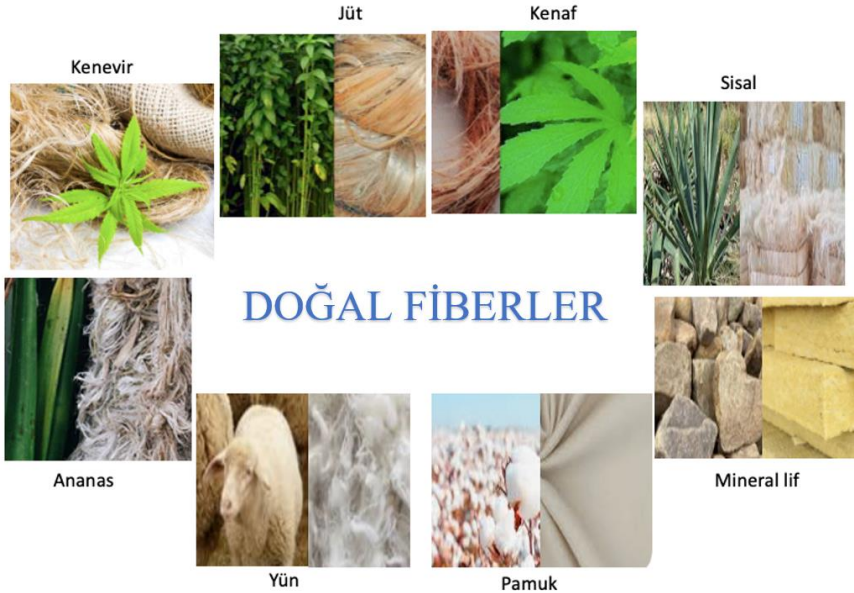


Kaynak: (Karimah et al., 2021; Suriani et al., 2021)

Doğal fiberler, daha ucuz olmaları ve olumlu çevresel etkilere sahip olmaları nedeniyle şu anda sentetik fiberlere tercih edilmektedir. Küresel enerji krizi ve sürdürülebilirlik doğrultusunda, doğal fiberler, sentetik fiberlere kıyasla toksik olmamaları, yüksek performansları, düşük maliyetleri, işlenmelerinin kolaylığı, bollukları, çok yönlülükleri, cilt, göz veya solunum sisteminde tahrişe neden olmamaları ve aşındırıcı olmamaları nedeniyle büyük ilgi görmüştür.

Bina ve inşaat sektörleri, ulaşım, depolama cihazları, elektrikli cihazlar ve günlük uygulamalar, doğal fiberlerin özel niteliklerinden faydalanmıştır. Doğal fiber takviyeli kompozit malzemeler, yukarıda belirtilen uygulamalarda giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır. ancak bu kompozitlerde, polimerler gibi malzemeler matris fazı için gereklidir (Thapliyal et al., 2023).

Şekil 3 Doğal fiberlere bazı örnekler



Kompozitler bileşenlerinin her birinin aynı fiziksel özelliklere sahip olması nedeniyle, mikroskobik düzeyde homojen

malzemeler olarak da kabul edilebilirler. Kompozitlerde odun, ot ve sap fiberleri kullanılırken, ticari biyokompozitlerin üretiminde tohum, kabuk ve yaprak fiberleri gibi bitki fiberleri kullanılmaktadır. Fiberlerin su emme performansından esas olarak sorumlu olan ve birincil duvarlar ve içerdği duvarlar olarak, çeşitli duvar katmanları aracılığıyla oluşan merkezi oluşum ve lümen, bitki fiberlerinin doğal olarak iyi hazırlanmış karmaşık bir yapıya sahip olmasını sağlar.

Bitkisel fiber (selüloz bazlı) kompozitler

Pamuk, rami, jüt, kenevir, keten ve sisal dahil olmak üzere başlıca bitkisel fiberler selüloz bazlıdır. Kağıt ve tekstil endüstrisinde kullanılan ürünleri selüloz bazlı fiberlerden yapılır. Selüloz ve hemiselülozun lignin ile birbirine bağlanmasıyla oluşan heterojen, higroskopik, hücresel ve anizotropik bir katı olan odun fiberleri (yumuşak odun veya sert odun olarak da bilinir), çalılardan ve ağaçlardan elde edilir (Du et al., 2025). Yumuşak ağaç fiberleri esas olarak tek tip hücrelerden, trakeidlerden oluşur, sert ağaçların aksine kanal veya gözenek bulunmaz bu da malzemeye daha homojen bir yapı kazandırır.

Üç hidroksil grubu ve d-anhidro glikozdan ($C_6H_{11}O_5$) oluşan doğal olarak oluşan bir polimer olan selüloz, güçlü alkali ve oksitleyici kimyasallara karşı dirençlidir, ancak aside maruz kaldığında kolayca suda çözünen şekerlere hidrolize olur (V. More et al., 2025). Hemiselüloz, beş ila altı karbon halkasına sahip şekerlerden oluşan bir polisakkarit sınıfıdır. Yan gruplarla önemli miktarda zincir dallanması nedeniyle kristal yapıda değildir. Hemiselüloz, hidrofilik, asitlerde hidrolize edilebilir ve alkalilerde çözünebilir olduğu için selüloz mikrofibrillerini birbirine bağlar (Dai et al., 2025). Aynı bitkiden gelmelerine rağmen, doğal fiberler kimyasal bileşimleri, mikrofibril açıları, yapıları, fiziksel özellikleri, kristal selüloz genişlikleri, kusurları ve izolasyon yöntemleri bakımından farklılık gösterebilir. Bu doğrultuda mekanik özellikleri ve nitelikleri de önemli ölçüde farklılık gösterebilir.

Fiber sertliği esas olarak hemiselüloz, selüloz ve lignin tarafından şekillendirilir. Fiberin genel özellikleri, bu bileşenler arasındaki denge tarafından etkilenir. Hidrojen bağları özellikle önemlidir çünkü lignin ve hemiselülozları doğrusal selüloz makromoleküllerine bağlarlar. Bu bağlantılar, fiberleri bir arada tutmanın yanı sıra fiberin hücre duvarındaki selülozu da güçlendirir. Kompozitin nihai özellikleri ve performansı, termomekanik özellikler, takviye fazının yönlenmesi ve dağılımı ile fazlar arasındaki arayüz özelliklerine bağlıdır. Hem fiberler hem de matris bu durumda kimyasal ve fiziksel özelliklerini korur, ancak tek başına hiçbir bileşenle mümkün olmayan bir dizi nitelik sağlamak için bir araya gelirler. Geliştirilmiş arayüz özellikleri, yük kuvvetlerinin matristen fiberlere daha etkili bir şekilde aktarılmasını kolaylaştırır (Hamzat et al., 2025).

Ekolojik olarak parçalanabilir doğal fiberler içeren kompozitler, sentetik fiberlerle yüklenmiş kompozitlere göre bertaraf edilmesi daha kolay, daha güvenli ve daha ucuzdur (Puttegowda, 2025). Ayrıca, keten gibi doğal fiberlerin üretimi için (aktivasyon, hasat ve fiber işleme dahil) sadece 9,55 MJ/kg enerji gerekirken, cam fiber için bu rakam 54,7 MJ/kg'dır (Gudayu et al., 2025). Doğal fiberlerin cam fibere ($\sim 2,5 \text{ g/cm}^3$) kıyasla daha düşük yoğunluğu (jüt 1,3~1,49 g/cm^3), dolgulu kompozitlere daha yüksek özgül mukavemet ve sertlik kazandırabilir, ancak doğal fiberlerin kullanımında nem emilimi, mantar-böcek saldırısı ve hidrofobik matrislere zayıf yüzey yapışması da dikkate alınmalıdır (Hossain et al., 2025).

Hayvansal fiber bazlı (protein bazlı) kompozitler

Protein fiberleri olarak da adlandırılan hayvansal fiberler bitkisel kaynaklı fiberlerden sonra, en çok kullanılan ikinci fiber türüdür. Kaşmir, alpaka, ipek, koyun, bizon, misk öküzü, kümes hayvanları ve ördekler bu fiberlerin kaynaklarıdır. Biyokompozitler yapılırken, hayvansal fiberler genellikle doğranmış fiberler veya

parçacıklar halinde kullanılır. Protein fiberleri, doğal yangın direnci ve termal kararlılık gibi olağanüstü özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, protein fiberleri bitkisel fiberlerden daha pahalı olduğu için, hayvansal fiberler doğal olarak güçlendirilmiş fiber kompozitlerinin ticari üretiminde nadiren kullanılır (Eleutério et al., 2025).

Hayvansal fiberler protein açısından zengindir ve hücreler, organizmalar ve dokular için koruyucu görevi görmenin yanı sıra elastikiyet, kararlılık ve iskele gibi özelliklere katkıda bulunur. Bu fiberler, amino asitlerden oluşan polipeptit zincirinin türüne ve sırasına göre davranır. Düzensiz kimyasal bileşime ve karmaşık bir yapıya sahip olan keratin, hayvansal fiberlerin ana bileşenidir. protein fiberlerinin üç ana bölümü mevcuttur bunlar: korteks, kütikül ve medulladır (France Tribe et al., 2025) Ana fiberin mekanik özelliklerini belirler ve hacmini oluşturur. Balmumu kaplamasıyla kütikül, suyun fiberin içine nüfuz etmesini engelleyen koruyucu bir dış katman görevi görür.

Ayrıca, hayvan fiberleri bitki fiberlerinden daha iyi nem emer. Yaygın bulunabilirlikleri ve toksik olmamaları nedeniyle, ipek, yün, kürk ve tüy gibi hayvan fiberleri, kompozit takviyesi için tüm doğal fiber kaynakları arasında ikinci sırada yer alır. Ek olarak, hayvan fiberleri biyolojik olarak parçalanabilir, çevre dostu kompozitlerdir ve büyük miktarda katı atığın bertaraf edilmesinin bir yolunu sunar. Bitkisel fiberlerle karşılaştırıldığında, hayvansal fiberler daha pahalı ve daha az bulunur, bu da kompozitlerin kullanımını daha pahalı hale getirir. Bu fiberler biyolojik olarak uyumlu oldukları için, kullanımları çoğunlukla biyomedikal alandadır.

Mineral fiber bazlı kompozitler

Doğal mineral fiberler, minerallerde doğal olarak veya az miktarda modifikasyonla bulunabilir ve iki sınıfa ayrılır zararlı (asbest gibi) ve toksik olmayan (Eleutério et al., 2025). Mineral fiber

örnekleri arasında lifli brusit, wollastonit ve asbest bulunur. Doğal olarak oluşan tek mineral fiber asbesttir. Ticarete, olağanüstü çekme dayanımı, orta derecede kimyasal direnç ve düşük ısı iletkenliğine sahip amfibol mineralleri ve fiberli serpantin koleksiyonuna "asbest" denir. Wollastonit ve bazalt, kompozitlerde en sık kullanılan doğal mineral fiberlerdir. Kaya yünü ve cüruf yünü, erimiş kaya veya cüruftan buhar veya hava üfleyerek sentetik olarak üretilebilen mineral fiberlere örneklerdir (Milat et al., 2025).

Doğal mineral fiber kompozitleri, geleneksel fiberlere göre avantajları nedeniyle çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektronik, havacılık, tıp, denizcilik, araçlar ve beton yapısal bileşenler de dahil olmak üzere birçok endüstri, doğal mineral fiberlerin etkinliğini göstermiştir. Doğa, çeşitli uygulamalar için malzeme üretimi için sürekli olarak çeşitli kaynaklar sağlamaktadır. Sertleşmiş volkanik lav, magmatik bazaltı oluşturur. Asbest fiberlerine alternatif olarak bazalt dikkat çekmiştir. Kompozit fiber takviyesi alanında bazalt bir rakip olarak ortaya çıkmıştır (İlangovan, 2025).

Güçlü mekanik dayanım, mükemmel sıcaklık direnci, iyi kimyasal kararlılık, düşük enerji gereksinimleri ve minimum karbon ayak izi, bazalt fiberinin özellikleridir. Üstün korozyon direnci ve tasarım kolaylığı da sağlayan bazalt fiber takviyeli polimerler, yeni iletkenler, yalıtımlı çekme çubukları ve kompozit çapraz kollar gibi elektrikli ekipmanların uygulama gereksinimlerini karşılar. Bazalt fiberi son derece yüksek sıcaklıklara dayanabilir ve yüksek performanslı uygulamalarda kullanılabilir.

Doğal Fiberlerin Uygulama Alanları

Doğal fiber takviyeli polimer kompozit malzemelere olan ilgi hem endüstriyel uygulamaları hem de temel araştırmaları açısından hızla artmaktadır. Doğal fiberler yenilenebilir, ucuz, tamamen veya kısmen geri dönüştürülebilir ve biyolojik olarak parçalanabilirler.

Bulunabilirlikleri, yenilenebilirlikleri, düşük yoğunlukları, fiyatları ve tatmin edici mekanik özellikleri, onları kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan cam, karbon gibi sentetik fiberlere cazip bir ekolojik alternatif haline getirmektedir (Chandramohan & Marimuthu, 2011).

Şekil 4 Doğal Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitlerin Endüstriyel Kullanımları



Kaynak: (Kamarudin et al., 2022)

Doğal fiber içeren kompozitler daha çevre dostudur ve ulaşım (otomobiller, demiryolu vagonları, havacılık), askeri uygulamalar, inşaat sektörleri (tavan panelleri, bölme levhaları), ambalaj, tüketici ürünleri gibi alanlarda kullanılmaktadır (Chandramohan & Marimuthu, 2011). Doğal fiberler, çeşitli inşaat projelerinde takviye veya dolgu malzemesi olarak da kullanılabilir (Waghmare et al., 2022). Doğal fiber kompozitler, düşük yoğunlukları ve yüksek özgül özellikleri nedeniyle otomotiv ve ulaşım sektörlerinde büyük potansiyel sunmaktadır (Ahmad et al., 2015). Doğal fiber kompozitlerin ekonomik kullanımının,

gelişmekte olan ülkelerde sosyal ve ekonomik ilerleme için büyük bir fırsat oluşturduğuna dair kanıtlar mevcuttur (Koronis et al., 2013; Spiridon, 2014).

Otomotiv sektöründeki malzemelerin geri dönüştürmeye ve yeniden kullanmaya zorlayan mevzuatlar nedeniyle kompozit malzemelerde doğal fiberlerin kullanımları artmaktadır. Bu da otomotiv uygulamalarında biyolojik bazlı malzeme içeriğinin artmasına yol açmaktadır (Huda et al., 2008). Polimer matrisli doğal fiber kompozitler Avrupa otomobil üreticileri ve tedarikçileri tarafından kapı panelleri, koltuk arkalıkları, tavan döşemeleri, bagaj rafları, gösterge panelleri ve iç mekan parçalarında kullanılmaktadır (Holbery & Houston, 2006). Düşük ağırlıkları ve maliyetleri sayesinde diğer ulaşım araçlarında da kullanımı artmaktadır. Böylece kompozitler havacılık sektöründe uçakların performanslarını ve yakıt verimliliği artırmaktadır (Pickering et al., 2016; Sonali et al., 2023). Tekne gövdeleri, kanolar ve sörf tahtaları gibi denizcilik uygulamalarında kullanımları da bulunmaktadır. Ancak doğal fiberlerin hidrofilik yapısı nedeniyle bu alandaki kullanımı sınırlı olmaktadır. Yine de çeşitli kimyasal/termal uygulamalar, hibritleştirme yöntemleri, üretim en iyileştirmeleri ve doğru matris malzeme seçimi ile fiberlerin su emme kapasitesi düşürülebilmektedir (El Hawary et al., 2023). Dahası bu işlemler ile mekanik özelliklerde de iyileşmeler elde edilebilmektedir (Faruk et al., 2012).

Doğal fiber kompozitler inşaat ve yapı sektöründe hem yapısal olmayan hem de yarı yapısal elemanlarda tercih edilmektedir. Özellikle ısı ve ses yalıtım levhaları, dekoratif yapı elemanları, kapı ve pencere çerçeveleri, duvar ve tavan panellerinde kullanılmaktadır. Düşük maliyetli olması, iyi termal ve akustik yalıtım sağlaması ve çevre dostu olması bu alanlarda kullanım için avantaj sağlamaktadır (Asim et al., 2015; Elfaleh et al., 2023; Peças et al., 2018; Salpriyan et al., 2025; Sonali et al., 2023). Doğal fiber

takviyeli kompozitleri dış mekan kullanımına uygun hale getirmek ve su emme direnci oluşturmak için yüzey kaplamaları veya modifikasyonları gerekmektedir (Peças et al., 2018). Bunların yanında mobilya sektöründe de hem çevreci olması hem de hafiflik ve maliyet açısından doğal fiber takviyeli kompozitler tercih edilebilmektedir. Bu kompozitler kapaklar, masa ve dolap panellerinde kullanılmaktadır (Kamarudin et al., 2022).

Enerji alanında keten takviyeli polyester türbin kanatlarının cam fiber takviyeli kanatlar karşısında kullanılabilir bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır (Shah et al., 2013). Bisiklet gövdeleri veya kayak takımları gibi spor ekipmanlarında hafiflik, maliyet, esneklik ve çevre dostu dengesini sağlayabilmektedir. Yüksek özgül elastisite modülü ve darbe dayanımı aranan uygulamalarda sentetik fiberlerle karma kullanımları avantajlarını arttırarak performanslarını yükseltebilir (Amiri et al., 2018; Karacor & Özcanlı, 2023; Yan et al., 2014). Balık oltaları kök sebzelerden nanoselüloz elde edilerek geliştirilen malzemeden üretilebilmektedir (Pickering et al., 2016). Doğal fiber takviyeli kompozitler telli müzik aletlerinin üst plakaları için de potansiyel bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (Phillips & Lessard, 2012). Jüt polietilenden üretilen biyoplastik poşetler çevre dostu, geri dönüştürülebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir oldukları için plastik poşetlerin yerine kullanılmaktadır. Bu ürün aynı zamanda giyim, gıda ve süt ürünlerinin ambalajlanmasında da kullanılabilir (Sonali et al., 2023).

Sonuçlar

Bu çalışmada, doğal fiber takviyeli polimer kompozitlerin özellikleri, sınıflandırılması ve endüstriyel uygulamaları kapsamlı biçimde incelenmiştir. Özellikle otomotiv endüstrisi odağında değerlendirildiğinde, doğal fiberlerin düşük yoğunluk, yenilenebilirlik, biyobozunurluk ve maliyet avantajları sayesinde cam ve karbon fiber gibi sentetik takviyelere çevre dostu bir

alternatif sunduğu görülmektedir. Avrupa başta olmak üzere birçok otomotiv üreticisinin kapı panelleri, tavan döşemeleri, koltuk arkalıkları ve iç trim parçalarında doğal fiber takviyeli kompozitleri tercih etmesi, bu malzemelerin endüstriyel uygulanabilirliğini açıkça ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, doğal fiberlerin hidrofilik yapısı, nem emilimi, biyolojik bozunma ve sentetik fiberlere kıyasla daha düşük mekanik dayanım gibi bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Literatürde sunulan çalışmalar, bu dezavantajların alkali ve silan gibi yüzey işlemleri, uygun matris seçimi ve doğal-sentetik hibrit kompozit tasarımları ile önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. Özellikle yarı-yapısal otomotiv bileşenlerinde hibrit sistemlerin kullanılması, mekanik performans ile sürdürülebilirlik arasında dengeli bir çözüm sunmaktadır.

Sonuç olarak, doğal fiber takviyeli polimer kompozitler hâlen gelişim aşamasında olmakla birlikte, çevresel mevzuatlar, sürdürülebilirlik hedefleri ve hafif malzeme ihtiyacı doğrultusunda çeşitli endüstrilerde kullanım potansiyeli giderek artmaktadır. Uygun yüzey modifikasyonları, üretim teknikleri ve hibrit yaklaşımlarla desteklendiğinde, doğal fiberlerin gelecekte daha geniş ölçekte kullanılabilecek sürdürülebilir bir takviye malzemesi olacağı öngörülmektedir.

Kaynakça

Ahmad, F., Choi, H. S., & Park, M. K. (2015). A review: Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. In *Macromolecular Materials and Engineering* (Vol. 300, Issue 1). <https://doi.org/10.1002/mame.201400089>

Ahmed, R., Manik, K. H., Nath, A., Shohag, J. R., Mim, J. J., & Hossain, N. (2025). Recent advances in sustainable natural fiber composites: Environmental benefits, applications, and future prospects. In *Materials Today Sustainability* (Vol. 32). <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101220>

Amiri, A., Krosbakken, T., Schoen, W., Theisen, D., & Ulven, C. A. (2018). Design and manufacturing of a hybrid flax/carbon fiber composite bicycle frame. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 232(1). <https://doi.org/10.1177/1754337117716237>

Asim, M., Abdan, K., Jawaid, M., Nasir, M., Dashtizadeh, Z., Ishak, M. R., Hoque, M. E., & Deng, Y. (2015). A review on pineapple leaves fibre and its composites. In *International Journal of Polymer Science* (Vol. 2015). <https://doi.org/10.1155/2015/950567>

Chandramohan, D., & Marimuthu, K. (2011). A review on natural fibers. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 8(2), 194–206.

Dai, Y., Xia, Q., Mao, Z., Mu, J., Peng, F., & Hao, X. (2025). Sustainable bioplastics build on d-xylose cores: from backup to the center stage. In *Green Chemistry* (Vol. 27, Issue 17). <https://doi.org/10.1039/d4gc06578f>

Du, H., Liu, K., Xu, T., Xu, C., Lin, M., Fang, Z., Kim, S.-W., Seo, J.-Y., Chen, J., Ma, H., Hsiao, B. S., DeVetter, L. W., Piao, Z., Si, C., Chen, C., Yang, Q., Lee, S.-Y., Yao, Y., & Pan, X. (2025).

Lignocellulosic Films: Preparation, Properties, and Applications.
Chemical Reviews.
<https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.5C00267>

El Hawary, O., Boccarusso, L., Ansell, M. P., Durante, M., & Pinto, F. (2023). An Overview of Natural Fiber Composites for Marine Applications. In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 11, Issue 5). <https://doi.org/10.3390/jmse11051076>

Eleutério, T., Trota, M. J., Meirelles, M. G., & Vasconcelos, H. C. (2025). A Review of Natural Fibers: Classification, Composition, Extraction, Treatments, and Applications. In *Fibers* (Vol. 13, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/fib13090119>

Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M., & Garnier, C. (2023). A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. In *Results in Engineering* (Vol. 19). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. In *Progress in Polymer Science* (Vol. 37, Issue 11). <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

France Tribe, S. R., Lee, P. X., Czibula, C., Simões, M. G., Bleher, R., Duncan, K. E., Thoman, M., Topp, C. N., Dravid, V. P., & Chazot, C. A. C. (2025). The Hierarchical Structure of Sheep Wool and Its Impact on Physical Properties. *Advanced Functional Materials*. <https://doi.org/10.1002/adfm.202510035>

Gudayu, A. D., Getahun, D. E., Mekuriaw, D. M., Walelign, F. T., & Ahmed, A. S. (2025). Natural fiber reinforced cementitious composites; materials, compatibility issues and future perspectives. *Composite Interfaces*, 32(3).
<https://doi.org/10.1080/09276440.2024.2417162>

Hamzat, A. K., Murad, M. S., Adediran, I. A., Asmatulu, E., & Asmatulu, R. (2025). Fiber-reinforced composites for aerospace, energy, and marine applications: an insight into failure mechanisms under chemical, thermal, oxidative, and mechanical load conditions. In *Advanced Composites and Hybrid Materials* (Vol. 8, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s42114-024-01192-y>

Holbery, J., & Houston, D. (2006). Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications. In *JOM* (Vol. 58, Issue 11). <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0234-2>

Hossain, S., Saeed, M. A., Islam, T., Islam, S., Jalil, M. A., Rahman, M. M., & Das, S. C. (2025). Characterization of novel *Annona reticulata* fiber as a potential reinforcement for composite applications. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15601-9>

Huda, M. S., Drzal, L. T., Ray, D., Mohanty, A. K., & Mishra, M. (2008). Natural-fiber composites in the automotive sector. In *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*. <https://doi.org/10.1533/9781845694593.2.221>

Ilangovan, S. (2025). A short review on basalt fiber-reinforced composites in advanced civil structural applications. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.70163>

Kamarudin, S. H., Mohd Basri, M. S., Rayung, M., Abu, F., Ahmad, S., Norizan, M. N., Osman, S., Sarifuddin, N., Desa, M. S. Z. M., Abdullah, U. H., Mohamed Amin Tawakkal, I. S., & Abdullah, L. C. (2022). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 17). <https://doi.org/10.3390/polym14173698>

Karacor, B., & Özcanlı, M. (2023). Analysis of mechanical properties of flax/carbon fiber reinforced hybrid composites produced using two different production methods. *Mühendislik*

Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(2).
<https://doi.org/10.21923/jesd.1130727>

Karimah, A., Ridho, M. R., Munawar, S. S., Ismadi, Amin, Y., Damayanti, R., Lubis, M. A. R., Wulandari, A. P., Nurindah, Iswanto, A. H., Fudholi, A., Asrofi, M., Saedah, E., Sari, N. H., Pratama, B. R., Fatriasari, W., Nawawi, D. S., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2021). A comprehensive review on natural fibers: Technological and socio-economical aspects. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 24). <https://doi.org/10.3390/polym13244280>

Koronis, G., Silva, A., & Fontul, M. (2013). Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. *Composites Part B: Engineering*, 44(1). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.004>

Milat, M., Juradin, S., Ostojić-Škomrlj, N., & Tesovnik, A. (2025). Recycling Mineral Wool Waste: Towards Sustainable Construction Materials. In *Recycling* (Vol. 10, Issue 5). <https://doi.org/10.3390/recycling10050174>

Peças, P., Carvalho, H., Salman, H., & Leite, M. (2018). Natural fibre composites and their applications: A review. *Journal of Composites Science*, 2(4). <https://doi.org/10.3390/jcs2040066>

Phillips, S., & Lessard, L. (2012). Application of natural fiber composites to musical instrument top plates. *Journal of Composite Materials*, 46(2). <https://doi.org/10.1177/0021998311410497>

Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 83). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>

Puttegowda, M. (2025). Eco-friendly composites: exploring the potential of natural fiber reinforcement. In *Discover Applied Sciences* (Vol. 7, Issue 5). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06981-8>

Salprian, P. M., Krishna, K., & Singh, T. (2025). Recent developments in natural fibre polymer composite materials for interior design applications: an overview from acoustic perspective. In *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* (Vol. 19, Issue 3). <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01935-7>

Shah, D. U., Schubel, P. J., & Clifford, M. J. (2013). Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study. *Composites Part B: Engineering*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.027>

Sonali, S., Farzana, M., Haque, Md. M., Saha, A., Khan, R. A., Mollah, M., Sonali, S., Farzana, M., Haque, Md. M., Saha, A., Khan, R. A., & Mollah, M. (2023). Natural fiber reinforced polymer-based composites: importance of jute fiber. *Https://Gsconlinepress.Com/Journals/Gscarr/Sites/Default/Files/GSCARR-2023-0078.Pdf*, 15(1), 021–029. <https://doi.org/10.30574/GSCARR.2023.15.1.0078>

Spiridon, I. (2014). I. Natural fiber-polyolefin composites. Mini-review. In *Cellulose Chemistry and Technology* (Vol. 48, Issues 7–8).

Suriani, M. J., Ilyas, R. A., Zuhri, M. Y. M., Khalina, A., Sultan, M. T. H., Sapuan, S. M., Ruzaidi, C. M., Wan, F. N., Zulkifli, F., Harussani, M. M., Azman, M. A., Radzi, F. S. M., & Sharma, S. (2021). Critical review of natural fiber reinforced hybrid composites: Processing, properties, applications and cost. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 20). <https://doi.org/10.3390/polym13203514>

Thapliyal, D., Verma, S., Sen, P., Kumar, R., Thakur, A., Tiwari, A. K., Singh, D., Verros, G. D., & Arya, R. K. (2023). Natural Fibers Composites: Origin, Importance, Consumption Pattern, and Challenges †. In *Journal of Composites Science* (Vol. 7, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/jcs7120506>

V. More, R., Antanitta. S, V., Khonde, R., & Kandasubramanian, B. (2025). Cellulose and derivatives serving as natural, versatile and biocompatible polymers in biomedical applications. In *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials* (Vol. 74, Issue 10). <https://doi.org/10.1080/00914037.2024.2376247>

Waghmare, S., Shelare, S., Aglawe, K., & Khope, P. (2022). A mini review on fibre reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.379>

Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (2014). Flax fibre and its composites - A review. *Composites Part B: Engineering*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014>

BÖLÜM 9

POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERDE ULTRASONİK MUAYENENİN UYGULANABİLİRLİĞİ

CENAP GÜVEN ¹
RÜYA AKINCI ²

Giriş

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla fazın makroskobik ölçekte bir araya getirilmesiyle elde edilen mühendislik malzemeleridir. Özellikle karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) ve cam fiber takviyeli polimerler (GFRP) gibi polimer matrisli kompozitler (PMC), birçok mühendislik alanında giderek artan oranda kullanılmaktadır. Kompozitlerin üretim süreçlerinde (el yatırması, vakum reçine infüzyon yöntemi, pultrüzyon yöntemi, püskürtme yöntemi, elyaf sarması vb.) veya kullanımı sırasında malzeme içerisinde hatalar meydana gelebilmektedir. Ayrıca çevresel koşullar da (sıcaklık, asitli ortam, su vb.) performanslarını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu etkenlere bağlı olarak kompozitlerde, matris çatlakları, lif ayrılması, delaminasyon,

¹Öğr. Gör. Dr. Harran Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Orcid:0000-0001-9868-3249

²Öğr. Gör. Harran Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Orcid: 0000-0001-6272-1178

yabancı madde inklüzyonları, lif kırılması, gözenekler ve katmanlar arasında görünmeyen hasarlar meydana gelir ve bu hasarların özel yöntemler olmadan tespit edilmesi zordur (Papa, Lopresto & Langella, 2021; Liu, Kutlu & Chang, 1993; Schoeppner & Abrate, 2000; Zhang, Zhu & Lai, 2006; Isbilir & Ghassemieh, 2013). Polimer kompozit malzemelerin incelenmesi, anizotropik yapı, karmaşık geometri, çoklu arıza modları ve göze çarpmayan kusurlardan dolayı diğer malzemelere kıyasla zordur (Non-Destructive-Testing, 2024). Bu nedenle yapı bütünlüğünün ve güvenliğinin sağlanması açısından güvenilir tahribatsız muayene yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Blackman, Jack & Blandford, 2021; Workman & Moore, 2007). Polimer kompozitlerde hataları belirlemek için çeşitli tahribatsız teknikler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bunlar arasında shearografi, radyografi, termografi, görsel inceleme, akustik emisyon, terahertz ve ultrasonik muayene yer almaktadır (Amenabar & ve ark., 2011; Poudel & ve ark., 2015; Marani & ve ark., 2018; Wang & ve ark., 2019; Gholizadeh, 2016).

Ultrasonik muayene yöntemi, polimer kompozitlerde hataları belirlemede kullanılan tahribatsız yöntemlerin en başında yer almaktadır. Bu yöntem, yüksek frekanslı mekanik dalgaların malzeme içerisindeki yayılımı ve yansımaları esasına dayanır. Metalik malzemelerde uzun yıllardır başarıyla kullanılan bu yöntem, uygun teknik ve prob seçimi yapıldığında polimer kompozit malzemelerde de etkin şekilde uygulanabilmektedir. Ultrasonik muayene sonucu, kompozitlerdeki lif dağılımını, lif miktarını, lif boyutu ve elastik özellikler hakkında da bilgi edinmek mümkündür. (El-Sabbagh, Steuernagel & Ziegmann, 2013; Wang & ve ark., 2022).

Ultrasonik muayene, polimer kompozitlerde meydana gelen hataların tespitinde tahribatsız muayene alanında birçok kolaylık sağlamaktadır.

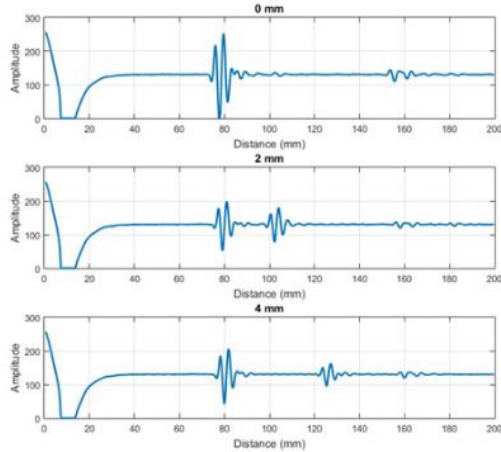
Polimer Kompozitlerde Kullanılan Ultrasonik Muayene Teknikleri

Polimer kompozit malzemelerde hatanın yeri ve konumu farklı Ultrasonik Muayene teknikleri ile belirlenmektedir. Bu tekniklerden en çok kullanılanları; A-Tarama Tekniği, B-Tarama Tekniği, C-Tarama Tekniği ve S-Tarama Tekniğidir.

A- Tarama Tekniği

Bu tarama tekniği yönteminde X eksenini derinliği yani zaman/ses yolunu, Y eksenini ise yankı genliğini gösterir. Ses dalgalarının parça üzerinde yayılma hızı bilinirse malzeme kalınlığı olarak da gösterilir. Bu teknikte hatanın konumunu, çeşidini ve boyutu tespit etmek mümkündür. Cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerinde A-tarama tekniği üzerine yaptığı çalışmada tabaka üzerine açılan farklı çaplardaki deliklerin su deposu içerisinde A-tarama tekniğiyle çok başarılı bir şekilde tespit edildiğini söylemiştir (Şekil 1).

Şekil 1. Cam elyaf takviyeli polimer kompozite ait A-tarama tekniği görüntüleri

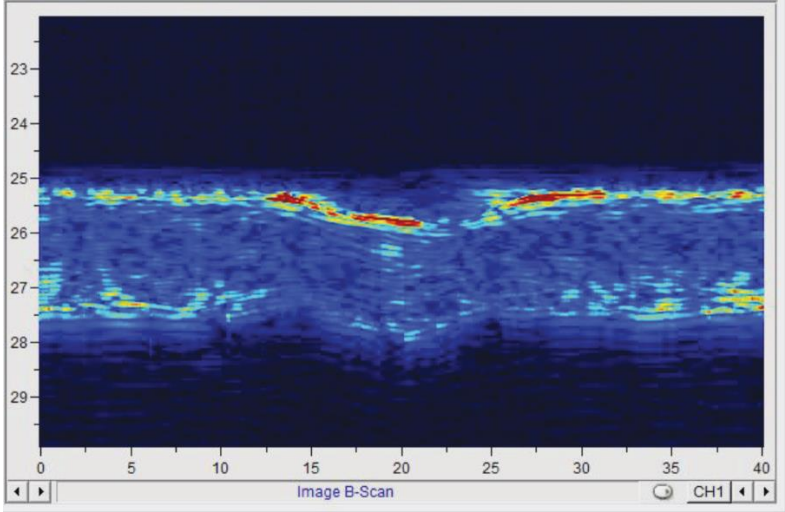


Kaynak: (Mahmod, 2015)

B- Tarama Tekniği

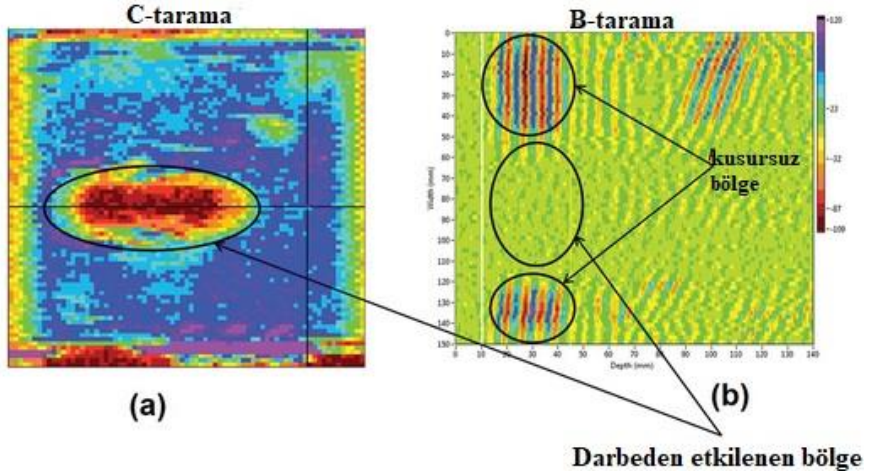
Proben bir hat boyunca lineer hareketi sırasında alınan A-tarama tekniği ile elde edilen görüntülerin yan yana konulduğu kesit görünümüdür. X-ekseni probun hareket mesafesini, Y-ekseni ise derinliği gösterir. Her A-tarama tekniğindeki sinyaller noktasal olarak parlaklık (brightness) seviyesine dönüştürölür. Güçlü ekolar parlak (beyaz), zayıf ekolar koyu (siyah) gösterilir. Hatanın derinlikteki uzantısını ve şeklini kesit olarak gösterir. B-Tarama tekniği yardımıyla kalın kompozitler için farklı kusurları araştırmalar yapılmıştır. Karmaşık mikro yapılarla sahip havacılık ve uzay kompozitleri için B- tarama tekniğiyle hem simölasyon hem de deney yoluyla çalışmalar yapıp, lif dalgalanmasına sahip kalın kompozitlerde kusur farklılaştırması ve karakterizasyonu için farklı frekanslarda hem genlik hem de faz bilgisine sahip ultrasonik B-tarama tekniği görüntülemeyle havacılık ve uzay kompozitlerinin ultrasonik testinin iyileştirilmesi için yön göstereceğini söylemişlerdir (Zhang & ark., 2020). Cam elyaf takviyeli polimer kompozitte 35 Joule darbe etkisinde meydana gelen hasar görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir. Bazalt lif takviyeli polimer kompozitte 12 Joule darbe etkisinde meydana gelen hasar görüntüleri B- tarama tekniği ve C- tarama tekniği görüntüleri Şekil 3’ de verilmiştir.

Şekil 2. Cam elyaf takviyeli polimer kompozit B-tarama tekniği hasar görüntüsü



Kaynak: (Bouzar Essaidi & ve ark., 2024)

Şekil 3. B-tarama tekniği bazalt fiber kompozit hasar örnekleri



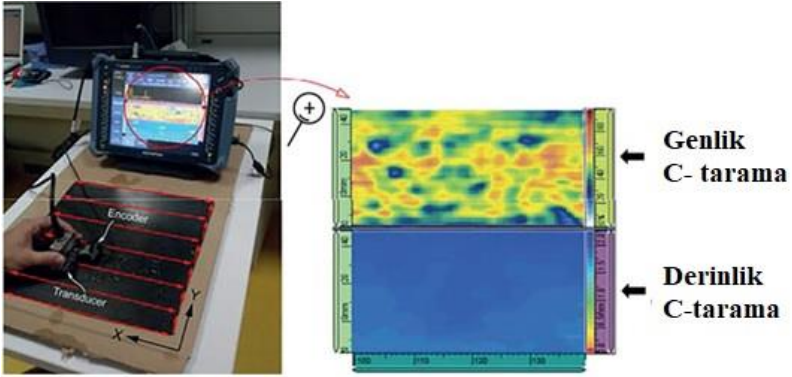
Kaynak: (Arunprasath & ve ark., 2023)

C-Tarama Tekniği

C-tarama tekniği, kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan ultrasonik muayene tekniğidir. Probun X–Y düzleminde taranmasıyla elde edilen veriler, belirli bir derinlik aralığında iki boyutlu harita (üstten görünüm) şeklinde sunulur. Her (x,y) noktası için, belirli bir derinlik aralığındaki maksimum eko genliği veya ilk ekonun geliş zamanı bir renk tonuna dönüştürölür. Renk skalası hata büyüklüğünü veya derinliğini temsil eder. Genellikle bir su tankında otomatik/immersion sistemlerle gerçekleştirilir (Scott & Scala, 1982). Delaminasyon, darbe hasarı ve yapışma kalitesinin alan bazlı değerlendirilmesinde son derece etkilidir. Havacılık alanında C-tarama tekniği en fazla kullanılan tahribatsız yöntemlerin başında gelmektedir (Růzek, Lohonka & Jironč, 2006). Cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerde hatanın bulunması ile ilgili yapılan çalışmalar C- tarama tekniğinin başarılı bir tahribatsız muayene yöntemi olduğunu göstermiştir (Harizi & ve ark., 2015). Cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerde yapay olarak oluşturulan kusurların C-tarama tekniği ilgili çalışmalarda ultrasonik muayenenin lamine kompozitlerde kusur tespitinde CFRP numunelerinde GFRP'ye kıyasla daha etkili olduğunu, GFRP numunelerinde ise cam elyaflardan kaynaklanan yüksek saçılma ve yankı örtüşmesi nedeniyle kusur tespitinde daha düşük frekanslı ve odaklanmış prob kullanımının gerekli olduğunu belirtmişlerdir (Hasiotis, Badogiannis, & Tsouvalis, 2011). Farklı kalınlıktaki CFRP kompozit laminantla ilgili çalışmalarda yaygın inklüzyon, delaminasyon, katman ve hacimsel gözeneklilik kusurlarını ultrasonik daldırma tipi C-tarama tekniği tekniğiyle inceleyerek tespit edilebildiğini ancak daldırma tipi C-tarama tekniği iç kusurların belirlenmesinde oldukça etkili olsa da büyük ölçekli parçalar için boyutsal sınırlamalara sahip olduğunu belirtmişlerdir (Durmaz, Bandaru, & O'Higgins, 2025). Sıcaklık değerisimlerinin karbon fiber laminantlardaki hasar incelemesinde, kompozitlerin

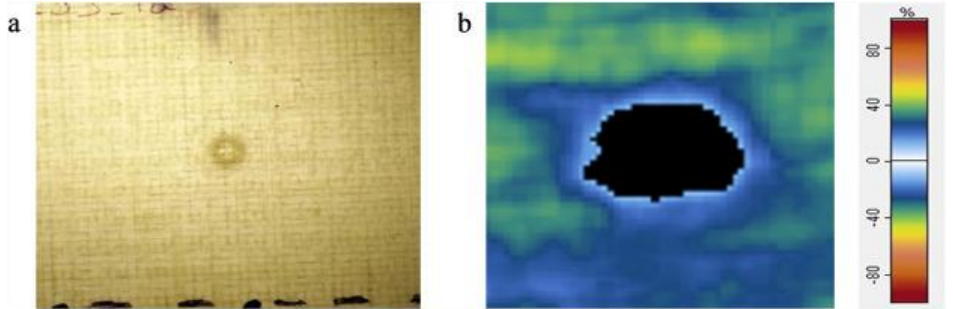
çatlaklara neden olabileceği tespit edilmiştir. (Shiino & ve ark., 2012). Savaş uçağındaki karbon fiber kompozit ile titanyum arasındaki yapışma kaybı kusurlarını C- tarama tekniği ile tespit etmişlerdir. (Patronen & ve ark., 2018). Karbon fiber takviyeli laminant C-tarama tekniği görüntüleri Şekil 4’te, Cam elyaf takviyeli laminant C-tarama tekniği görüntüleri Şekil 5’te verilmiştir.

Şekil 4. Karbon fiber takviyeli laminant C-tarama tekniği



Kaynak: (www.bakerhughes.com)

Şekil 5. Cam elyaf takviyeli laminant C-tarama tekniği



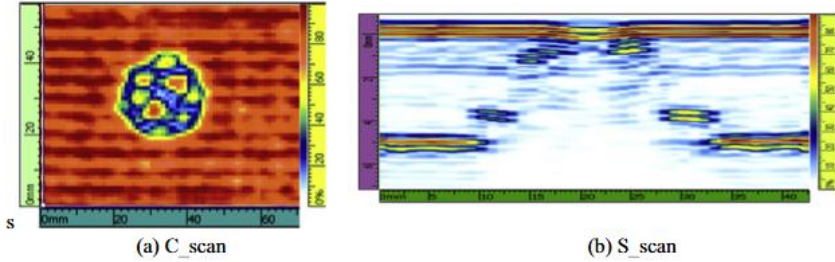
Kaynak: (Papa, Lopresto & Langella, 2021)

S-Tarama Tekniği

S-Tarama tekniği, birden çok piezo-elektrik elemandan oluşan bir dizi prob kullanarak ultrasonik dalgaları elektronik olarak yönlendiren, odaklayan ve tarayan gelişmiş bir ultrasonik muayene tekniğidir. Toplanan veriler, ışının kapsadığı açısal segmenti gösteren bir B-tarama tekniği görüntüsü olarak görüntülenir. Faz Dizili (PAUT) problarla yapılır. Prob sabitken, ultrasonik ışının açısal olarak taranmasıyla (rn. 30°-70°) elde edilen dilimli kesit görüntüsüdür. Görüntü bir daire dilimi şeklinde. Açısal eksen ve mesafe eksenı vardır. Probun altındaki bölgenin açısal kesitini gösterir. Hatanın hem derinliğini hem yatay konumunu tek görüntüde verir. Faz Dizili Ultrasonik Test (PAUT), malzemelerdeki kusurları yüksek hassasiyet ve esneklikle tespit etmek için gelişmiş ses ışını manipülasyonunu kullanan güçlü bir tahribatsız test (NDT) yöntemidir. Sabit açılı problara dayanan geleneksel ultrasonik testin aksine, PAUT, ultrasonik ışınları elektronik olarak yönlendirmek, odaklamak ve tarama tekniği için ayrı ayrı kontrol edilebilen küçük dönüştürücü elemanlardan oluşan bir dizi kullanır. Bu, hızlı inceleme, gelişmiş tespit yeteneği ve özellikle karmaşık bileşenler veya kritik kaynaklar için değerli olan i yapıların ayrıntılı görüntülenmesini sağlar (Durmaz, Bandaru, & O’Higgins, 2025). Karbon fiber takviyeli kompozitlerde karşılaştırmalı yapılan çalışmada kusurların bulunmasında hem C- tarama tekniğinin hem de S- tarama tekniğinin başarılı olduğunu, C- tarama tekniği, temas olmadan büyük paneller üzerinde hataları hızlı bir şekilde tespit edildiğini, ancak derin kusurların varlığında kontrast kaybından etkileneneğini gözlemlemişlerdir. S-tarama tekniğinde ise, kalınlığın ölçümünde ve kalın parçaların muayenesinde daha etkili olduğunu, ancak yalnızca pürüzsüz yüzeylere uygulanabilir ve bir bağlantı ortamı olması gerektiğini vurgulamışlardır (şekil 6). Karbon fiber takviyeli laminantlarda faz dizili ultrasonik teknik, kompozit laminantlardaki yapay cisimlerin çoğunu hassas bir şekilde

konumlandırabilmiştir. Bununla birlikte, karbon fiber epoksi kompozitin yüksek sinyal zayıflaması ve bozulma özellikleri nedeniyle cisimlerin şekli ve boyutunu doğru bir şekilde belirlenemediğini saptamışlardır (Caminero & ve ark., 2019).

Şekil 6. Cam elyaf takviyeli laminant C-tarama tekniği



Kaynak: Meola & ve ark., 2015)

Sonuç

Sonuç olarak, polimer matrisli kompozit malzemelerde üretim süreçleri, servis koşulları ve çevresel etkiler nedeniyle ortaya çıkabilen delaminasyon, lif ayrılması, matris çatlakları ve gözeneklilik gibi iç kusurların tespiti, yapı bütünlüğü ve uzun dönemli güvenilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, ultrasonik muayene teknikleri; temassız veya yarı temassız uygulanabilmeleri, yüksek hassasiyet sağlamaları ve farklı kusur türlerini hem konumsal hem de boyutsal olarak değerlendirebilmeleri sayesinde polimer kompozitlerin tahribatsız muayenesinde öne çıkmaktadır. A, B, C ve S-tarama tekniği yöntemlerinin birlikte ve uygun prob, frekans ile tarama tekniği parametreleri seçilerek kullanılması, özellikle karmaşık yapıya sahip ve anizotropik özellik gösteren kompozit malzemelerde kusur karakterizasyonunun doğruluğunu artırmakta, böylece mühendislik yapılarında güvenlik, kalite kontrol ve servis ömrü tahminine önemli katkılar sağlamaktadır.

Kaynakça

- 1.Papa, I., Lopresto, V., & Langella, A. (2021). Ultrasonic inspection of composites materials: Application to detect impact damage. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4(1), 37-42.
- 2.Liu, S., Kutlu, Z., & Chang, F. K. (1993). Matrix cracking and delamination in laminated composite beams subjected to a transverse concentrated line load. *Journal of Composite Materials*, 27(5), 436-470.
3. Schoeppner, G. A., & Abrate, S. (2000). Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 31(9), 903-915.
4. Zhang, Y., Zhu, P., & Lai, X. (2006). Finite element analysis of low-velocity impact damage in composite laminated plates. *Materials & design*, 27(6), 513-519.
5. Isbilir, O., & Ghassemieh, E. (2013). Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites. *Composite Structures*, 105, 126-133.
- 6.<https://www.addcomposites.com/post/non-destructive-testing-for-composites-different-inspection-methods> (2024)
7. Blackman, N. J., Jack, D. A., & Blandford, B. M. (2021). Improvement in the quantification of foreign object defects in carbon fiber laminates using immersion pulse-echo ultrasound. *Materials*, 14(11), 2919.
8. Workman, G. L., & Moore, P. O. (Eds.). (2007). *Nondestructive Testing Handbook: Ultrasonic Testing/Technical Editors: Gary L. Workman, Doron Kishon; Editor: Patrick O. Moore*. American Society for Nondestructive Testing.

9. Amenabar, I., Mendikute, A., López-Arraiza, A., Lizaranzu, M., & Aurrekoetxea, J. (2011). Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades. *Composites Part B: Engineering*, 42(5), 1298-1305.
10. Poudel, A., Shrestha, S. S., Sandhu, J. S., Chu, T. P., & Pergantis, C. G. (2015). Comparison and analysis of Acoustography with other NDE techniques for foreign object inclusion detection in graphite epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 78, 86-94.
11. Marani, R., Palumbo, D., Renò, V., Galietti, U., Stella, E., & D'Orazio, T. (2018). Modeling and classification of defects in CFRP laminates by thermal non-destructive testing. *Composites Part B: Engineering*, 135, 129-141.
12. Wang, J., Zhang, J., Chang, T., & Cui, H. L. (2019). A comparative study of non-destructive evaluation of glass fiber reinforced polymer composites using terahertz, x-ray, and ultrasound imaging. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(6), 963-972.
13. Gholizadeh, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia structural integrity*, 1, 50-57.
14. El-Sabbagh, A., Steuernagel, L., & Ziegmann, G. (2013). Characterisation of flax polypropylene composites using ultrasonic longitudinal sound wave technique. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1164-1172.
15. Wang, B., He, P., Kang, Y., Jia, J., Liu, X., & Li, N. (2022). Ultrasonic testing of carbon fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Sensors*, 2022(1), 5462237.

16. Scott, I. G., & Scala, C. M. (1982). A review of non-destructive testing of composite materials. *NDT international*, 15(2), 75-86.
17. Růžek, R., Lohonka, R., & Jironč, J. (2006). Ultrasonic C-Scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification. *NDT & E International*, 39(2), 132-142.
18. Harizi, W., Chaki, S., Bourse, G., & Ourak, M. (2015). Mechanical damage characterization of glass fiber-reinforced polymer laminates by ultrasonic maps. *Composites Part B: Engineering*, 70, 131-137.
19. Zhang, Z., Liu, M., Li, Q., & Ang, Y. (2020). Visualized characterization of diversified defects in thick aerospace composites using ultrasonic B-scan. *Composites Communications*, 22, 100435.
20. Mahmod, M. F. (2015). Immersion ultrasonic inspection system for small scaled composite specimen.
21. Hasiotis, T., Badogiannis, E., & Tsouvalis, N. G. (2011). Application of ultrasonic C-scan techniques for tracing defects in laminated composite materials. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 57(3), 192-203.
22. Durmaz, T., Bandaru, A. K., & O'Higgins, R. M. (2025). Non-Destructive Evaluation of Induced Defects in Aerospace-Grade CFRP Composites Using Immersion Ultrasonic C-Scan. *Results in Engineering*, 108333.
23. <https://www.bakerhughes.com/waygate-technologies/blog/what-phased-array-ultrasonic-testing-paut>
24. Shiino, M. Y., Faria, M. C. M., Botelho, E. C., & Oliveira, P. C. D. (2012). Assessment of cumulative damage by using ultrasonic C-Scan on carbon fiber/epoxy composites under thermal cycling. *Materials Research*, 15, 495-499.

25. Patronen J., Stenroos C., Virkkunen M., Papula S., and Sarikka T. (2018) Inspection of carbonfiber–Titanium–carbonFiberstepped-Lap Joint European Conference on NDT, NDT.net.
26. Papa, I., Lopresto, V., & Langella, A. (2021). Ultrasonic inspection of composites materials: Application to detect impact damage. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4(1), 37-42.
27. Meola, C., Boccardi, S., Carlomagno, G. M., Boffa, N. D., Monaco, E., & Ricci, F. (2015). Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics. *Composite Structures*, 134, 845–853. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.119>
28. Caminero, M. A., García-Moreno, I., Rodríguez, G. P., & Chacón, J. M. (2019). Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 165, 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.091>
29. Bouzar Essaidi, A., Lourari, A., El Yousfi, B., & Benkedjough, T. (2024). Nondestructive Testing of Composite Materials: An In-Depth Study Using Ultrasonic Immersion Inspection. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 60(7), 750-763.
30. Arunprasath, K., Naresh, K., Amuthakkannan, P., Manikandan, V., & Kavitha, S. (2023). Study of low velocity impact failure responses of woven basalt fiber reinforced polymer composites using ultrasonic A, B and C scan techniques. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 9(3), 1356-1379.

BALİSTİK MALZEMELER

BÖLÜM 10

Meryem İPEK¹

İlyas KARTAL²

Giriş

Fransızca “balistique” sözcüğünden gelen “balistik” kelimesi, bir merminin silahtan (namludan) çıkarak hedefe ulaşması, atışın yapıldığı ortamdaki değişkenlere bağlı olarak değişen hareketlerini, hedefe çarptıktan sonraki enerjinin absorblanması ve oluşan bozulma/deformasyon davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Balistik bilimi, iç balistik, dış balistik ve terminal balistiği olmak üzere üç gruba ayrılır. İç ve dış balistikte merminin namlu ve havadaki hareketleri, terminal balistiğinde ise tanımda belirtildiği gibi hedefe çarpan mermi ve hedefte oluşan deformasyonlar incelenir. Bütün bu tanımlamalardan sonra zırh (koruyucu) tasarımı, karakteristiği ve deformasyon alanlarının araştırılması terminal balistiğin konusudur. Genel tanımı ile zırhlar; farklı ebatlardaki ve hızlardaki mermi ve şarapnel parçalarından mühimmat ve insanların korumaya yönelik üretilen donanımlardır. Zırhlar kullanım alanlarına göre kişisel zırhlar, hafif zırhlar ve ağır zırhlar olmak üzere üçe ayrılır (Candan, 2005).

Balistik koruyucu sistemler, kurşun, şarapnel ve benzeri tehdit unsurlarının enerjisini absorbe ederek ya da yönünü

¹ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul/Türkiye, Orcid: 0009-0005-0267-4900, meryemsonmez@marun.edu.tr

² Doç.Dr., Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul/Türkiye, Orcid: 0000-0001-9677-477X, ilyaskartal@marmara.edu.tr

değiştirerek hedefin zarar görmesini engelleyen yapısal çözümlerdir (Yıldız, 2020).

Tarihsel olarak balistik koruma, ilkel yöntemlerle başlamış, zamanla zırlı giysiler, çelik levhalar ve daha sonra kompozit malzemeler gibi daha sofistike sistemlerin geliştirilmesiyle evrim geçirmiştir. Modern çağda ise, yalnızca koruma sağlamak yeterli olmamış; koruma sistemlerinin hafif olması, hareket kabiliyetini azaltmaması ve çeşitli çevresel şartlara dayanıklı olması gibi ek gereksinimler ön plana çıkmıştır. Özellikle modern savaş senaryolarında, askerî personelin ağırlık taşıma kapasitesi ve hareket serbestliği, görev başarısını doğrudan etkileyen faktörlerdendir. Bu nedenle, günümüzde balistik koruma sistemleri tasarlanırken, koruma düzeyi ile birlikte ağırlık, esneklik, konfor ve maliyet gibi parametreler de göz önünde bulundurulmaktadır.

Balistik koruma, özellikle savaş alanlarında, güvenlik güçlerinin yürüttüğü operasyonlarda veya sivil bölgelerde meydana gelebilecek saldırılar sırasında ortaya çıkan ölümcül tehditlere karşı hayati öneme sahiptir. Etkili bir balistik koruma sistemi hem askeri operasyonların başarısını artırmakta hem de sivil alanlarda can kayıplarını önlemede kritik bir rol oynamaktadır.

1. Malzeme Bilimi ile Balistik Koruma İlişkisi

Balistik koruma sistemlerinin etkinliği, doğrudan kullanılan malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Malzeme bilimi, bu bağlamda, darbe altında malzeme davranışlarını anlamak ve optimize etmek için temel bir disiplin işlevi görmektedir.

Balistik korumanın etkinliği, doğrudan kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine, enerji absorpsiyon kapasitesine ve darbe dayanımına bağlıdır. Bu bağlamda malzeme bilimi, balistik

tehditlere karşı yeni nesil koruyucu sistemlerin tasarımında temel rol oynamaktadır (Aydın, 2019).

Balistik koruma sistemlerinde malzeme seçimi, doğrudan koruma düzeyi, ağırlık optimizasyonu ve darbe dayanımı ile ilişkilidir. Geleneksel olarak kullanılan yüksek sertlikteki çelik zırhlar, yüksek mukavemet sunsa da yoğunluklarının fazla olması (yaklaşık 7.8 g/cm^3) nedeniyle mobilitayı kısıtlamaktadır. Bu nedenle, son yıllarda hafif ve yüksek performanslı malzemelere yönelim artmıştır.

Seramik esaslı malzemeler, özellikle bor karbür (B_4C) ve silikon karbür (SiC), yüksek sertlikleri ve düşük yoğunlukları ile mermi çekirdeklerini parçalayarak balistik enerjiyi dağıtma işlevi görür. Ancak kırılğan yapıları nedeniyle, bu seramikler genellikle aramid lifler (Kevlar®, Twaron®) veya yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) gibi enerji absorbe eden polimer kompozitlerle desteklenir. Bu hibrit yapı, seramiğin penetrasyonu engelleme yetisi ile polimerlerin enerji yutma kapasitesini birleştirerek çok katmanlı balistik çözümler üretir.

Ayrıca, metal matrisli kompozitler (MMC) gibi ileri malzeme sistemleri, hafif metaller ile seramik partiküllerin birleşimi sayesinde hem yapısal dayanım hem de termal ve balistik performans sunar. Malzeme bilimi bu süreçte, mikro yapı-mekanik özellik ilişkisini inceleyerek, balistik performansı en üst düzeye çıkaracak optimize edilmiş malzeme sistemlerinin geliştirilmesini sağlar.

Bir balistik koruma malzemesinin performansı, darbe altındaki mekanik davranışını belirleyen çeşitli fiziksel ve yapısal parametrelerin dengelenmesine bağlıdır. Bu bağlamda, etkinliği belirleyen başlıca özellikler şunlardır:

Sertlik: Malzemenin, yüksek hızlı bir projeksiyonun yüzeye nüfuz etmesini engelleme kabiliyeti ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek sertlik, mermi çekirdeğini parçalayarak penetrasyonu azaltır.

Tokluk: Malzemenin kırılmadan önce absorbe edebileceği enerji miktarıdır. Tokluk, özellikle çoklu darbe durumlarında malzemenin yapısal bütünlüğünü koruyabilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Yoğunluk: Birim hacim başına kütle miktarını ifade eder. Düşük yoğunluklu malzemeler, taşınabilirlik ve mobilite açısından avantaj sağlarken, balistik performansın korunması için diğer mekanik özelliklerle denge içinde olmalıdır.

Elastisite ve Plastisite: Malzemenin deformasyon altındaki davranışını belirler. Elastik davranış, geçici şekil değişimini; plastik davranış ise kalıcı deformasyonu tanımlar. Balistik darbe altında bu özellikler, enerji dağılımı ve deformasyon modlarını etkiler.

Çatlak Yayılımına Direnç: Mikro düzeyde oluşan çatlakların ilerlemesini engelleyebilme kapasitesi, özellikle kırılğan malzemelerde (örneğin seramikler) balistik dayanımı doğrudan etkiler.

Modern balistik koruma sistemlerinde, bu parametrelerin tek bir malzeme ile optimize edilmesi genellikle mümkün değildir. Bu nedenle, farklı fonksiyonlara sahip malzemelerin birlikte kullanıldığı hibrit yapılandırmalar tercih edilmektedir. Örneğin, ön katmanda kullanılan yüksek sertlikteki seramik, kinetik enerjiyi absorbe ederek mermiyi parçalayabilirken; arka katmanda yer alan polimer bazlı kompozit veya tekstil takviyeli yapılar, geriye kalan şok enerjisini yayarak arka yüz travmasını minimize eder. Böylece sistem hem penetrasyonu önler hem de enerjiyi etkin bir şekilde sönümler.

2. Balistik Tehditlerin Sınıflandırılması

Balistik tehditler, farklı kaynaklardan gelen ve çeşitli fiziksel özelliklere sahip tehdit unsurlarını kapsar. Bu tehditler genel olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

2.1. Küçük Kalibreli Mermiler

Küçük kalibreli mermiler genellikle hafif silahlardan (tabancalar, tüfekler) ateşlenir ve zırh delici özelliklere sahip olabilirler. Tipik olarak çapları 5,56 mm ile 7,62 mm arasında değişir. Bu tür mermiler, yüksek hızları nedeniyle kinetik enerji ile nüfuz eder ve malzemenin yüzeyine doğrudan darbeler uygular.

- 9x19mm Parabellum mermisi
- 5.56x45mm NATO mermisi
- 7.62x39mm AK-47 mühimmatı

2.2. Yüksek Hızlı Şarapnel Parçaları

Şarapnel, patlayıcı cihazların (el bombaları, havan topları, kara mayınları) parçalanması sonucu oluşan düzensiz metal parçalarıdır. Şarapnel parçaları düzensiz şekillere, farklı büyüklüklere ve geniş hız aralıklarına sahiptir. Balistik koruma açısından şarapnel tehditleri, çoklu darbe senaryolarında ciddi bir risk oluşturur. Özellikleri, rastgele şekil ve boyut, çoklu darbe etkisi ve yüksek enerji transferi ve geniş zarar alanı olarak sıralanabilir.

2.3. Patlama Etkileri (Şok Dalgaları)

Patlayıcıların neden olduğu şok dalgaları, çevredeki yapılar ve canlılar üzerinde doğrudan bir basınç etkisi oluşturur. Şok dalgası, yüksek basınçlı bir gaz dalgası şeklinde ilerler ve malzemeler üzerinde ani, çok yüksek basınç farklılıkları oluşturur. Bu dalga,

özellikle yapıların bütünlüğünü tehdit eder ve klasik balistik tehditlerden farklı olarak geniş alanlara yayılan hasarlar meydana getirir. Özellikleri yüksek basınç uygulaması, hızlı basınç değişimi ve yapısal deformasyon ve çökmelerdir.

3. Balistik Malzemelerin Temel Mekanizmaları

Balistik koruma sistemlerinin temel amacı, yüksek hızlı tehdit unsurlarının taşıdığı kinetik enerjinin malzeme tarafından emilerek dağılmasını sağlamaktır. Bu süreç, enerji sönmüleme, deformasyon, çatlak ilerlemesi ve kırılma gibi çok aşamalı mekanizmaları içerir (Hazell, 2015).

3.1. Enerji Sönmüleme ve Deformasyon Mekanizmaları

Balistik darbeye maruz kalan bir malzeme, ilk aşamada elastik deformasyonla enerjiyi absorbe etmeye çalışır. Ancak bu deformasyon türü sınırlı bir enerji sönmüleme kapasitesine sahiptir (Cunniff, 1996). Darbenin şiddetine bağlı olarak, plastik deformasyon devreye girer ve malzeme kalıcı şekil değişikliğine uğrayarak daha fazla enerjiyi sönmümler (Backman, & Goldsmith, 1978).

Kompozit yapılarda, fiber çekilmesi ve lif kırılması önemli enerji yayma mekanizmalarıdır. Yüksek dayanımlı fiberler (örneğin aramid ve UHMWPE) darbeye karşı uzayarak enerjiyi emer, ardından kırılarak enerjiyi dağıtır (Demirtaş, 2021). Bu süreçte, matris malzemenin çatlaması ve delaminasyon oluşumu da enerji yayılımına katkı sağlar (Nurick & Lunt, 1995).

3.2. Yüksek Hızda Darbe Davranışı

Yüksek hızlı darbe olaylarında, malzemede şok dalgaları oluşur ve bu dalgalar elastik sınırların ötesinde plastik deformasyonlara ve kırılmalara yol açabilir (Hazell, 2015).

Bu durum, malzemenin sadece yüzeyinde değil, tüm hacminde ani atalet etkileri oluşturur. Ayrıca, yüksek gerinim hızlarında bazı malzemelerin mukavemeti azalabilir; bu, özellikle metallerde adiyabatik yumuşamaya neden olur (Meyers, 1994).

Bu nedenle, balistik malzemelerin tasarımında hız bağımlı mekanik davranışlar dikkate alınmalı hem dinamik hem de termal etkiler göz önünde bulundurulmalıdır (Gupta & Sherikar, 2020).

3.3. Yırtılma, Kırılma ve Çatlak İlerlemesi Süreçleri

Darbe sonrası oluşan mikro çatlaklar, eğer önlenemezse hızlı şekilde büyüyerek makro çatlaklara dönüşebilir. Bu, özellikle seramik ve kırılğan malzemelerde, mermiyi parçalayan bir mekanizma olarak işlev görür (Shockey & Curran 1990). Lifli ve katmanlı sistemlerde, yırtılma ve lif ayrılması, darbenin farklı yönlerde yayılmasını sağlayarak enerji absorpsiyonunu artırır (Cunniff, 1996).

Çatlak ilerlemesini kontrol altına almak için geliştirilen hibrit malzeme sistemlerinde, liflerin belirli yönlerde dizilimi ve nano ölçekli takviyelerin kullanımı gibi mikroyapısal yöntemler uygulanmaktadır.

3.4. Fiber Çekilmesi, Lif Kırılması ve Matris Çatlaması

Kompozit balistik malzemelerde başlıca enerji absorpsiyon mekanizmaları fiber çekilmesi, lif kırılması ve matris çatlamasıdır. Aramid fiberler gibi yüksek çekme dayanımlı malzemeler, çekilme sırasında yüksek miktarda enerji tüketir (Gupta & Sherikar, 2020).

Lifler çekilme sınırına ulaştığında kırılır ve böylece enerji absorpsiyon süreci tamamlanır.

Matris malzemenin çatlaması ise liflerin daha serbest hareket etmesini sağlayarak delaminasyonu tetikler ve enerjiyi daha geniş alana yayar (Nurick, Shave & Lunt, 1995).

4. Balistik Koruma Amaçlı Malzeme Türleri

Balistik koruma uygulamalarında kullanılan malzemeler, mermi, şarapnel ve patlama kaynaklı tehditleri etkili bir şekilde karşılayacak şekilde seçilmekte ve tasarlanmaktadır. Bu malzemeler, yüksek özgül dayanım, enerji sönümleme kapasitesi ve darbe sonrası bütünlüğü koruma gibi özellikleri ile öne çıkar. Bu bölümde, balistik koruma amacıyla kullanılan başlıca malzeme türleri detaylı bir şekilde ele alınmaktadır.

4.1. Yüksek Performanslı Fiber Malzemeler

Aramid Fiberler (Kevlar®, Twaron®): Aramid fiberler, moleküler yapılarındaki aromatik poliamid zincirlerinin sıkı hizalanması sayesinde yüksek dayanıklılık ve ısı direnci sunar. Bu özellikler, onları balistik koruma alanında yaygın tercih haline getirir. Ancak, aramid lifler UV ışınlarına ve nem emilimine karşı hassas olabilir, bu da performanslarını zamanla düşürebilir (Demirtaş & Şahin, 2021). Başlıca kullanım alanları:

- Kişisel zırh sistemleri: Balistik yelekler, miğferler
- Araç zırhlamaları: Hafif askeri ve polis araçları
- Havacılık uygulamaları: Patlamaya dayanıklı paneller

Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE): Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiberler, çok uzun ve düzenli moleküler zincir yapıları sayesinde hem düşük yoğunluk

hem de yüksek mukavemet sağlar. Bu sayede hafif ama güçlü balistik koruma malzemeleri olarak kullanılırlar. Ancak yüksek sıcaklıklarda yapısal deformasyon riski mevcuttur (Yılmaz, 2019).

UHMWPE, termal kararlılıkları sınırlıdır; ısıya maruz kaldıklarında liflerde deformasyon başlayabilir. Bu durum, yüksek sıcaklıkta operasyonlar veya patlama sonrası ortamlar için kullanım sınırlarını belirler. Yine de düşük yoğunluk ve üstün enerji absorpsiyonu özellikleri nedeniyle kişisel zırhlar ve hafif taşıyıcı platformlar için geniş kullanım alanı bulmuşlardır.

4.2. Seramik Malzemeler

Seramik malzemeler, yüksek sertlikleri ve aşınma dirençleri sayesinde balistik tehditleri ilk temas anında durdurmada kritik rol oynarlar. Genellikle bir kompozit yapının ön yüzüne yerleştirilirler ve arka destek tabakasıyla birlikte kullanılırlar.

Alümina (Al_2O_3): Alümina, en yaygın kullanılan balistik seramiklerden biridir. Yüksek sertliğe sahip olup diğer seramiklere göre üretimi ve işlemesi daha ekonomiktir.

Alümina, özellikle orta seviye tehditlere karşı (örneğin küçük kalibreli mermiler) etkili bir koruma sağlar. Ayrıca, çok katmanlı zırh sistemlerinde arka destek malzemesi ile birlikte kullanıldığında enerji yayılımında önemli bir rol oynar. Dezavantajı ise nispeten yüksek yoğunluk ve sınırlı kırılma tokluğudur.

Silisyum Karbür (SiC): Silisyum karbür, alüminadan daha düşük yoğunluğa (yaklaşık 3.2 g/cm^3) sahiptir ve daha yüksek sertlik değerleri sunar. Orta yoğunluk, yüksek sertlik kombinasyonuna sahip olup hızlı sıcaklık değişimlerine karşı yüksek direnç gösterir.

Bu özellikler, SiC' yi hem kişisel koruma sistemlerinde hem de zırhlı araçlarda tercih edilen bir seramik malzeme haline getirir. Özellikle orta-yüksek tehdit seviyelerine karşı etkinlik sağlar.

Bor Karbür (B₄C): Bor karbür, balistik seramikler arasında en düşük yoğunluğa sahip malzemedir (yaklaşık 2.5 g/cm³) ve mükemmel bir sertlik gösterir (yaklaşık 30–40 GPa). Düşük yoğunlukta olup mükemmel sertlik ve yüksek aşınma direnci gösterir.

Ancak, Bor karbürün kritik kırılma tokluğu düşüktür; çok yüksek enerjili darbelere karşı aniden kırılabilir. Bu nedenle, kullanım alanları özellikle hafif zırh sistemleri ve taşınması kolay kişisel korumalarla sınırlıdır.

4.3. Metalik Malzemeler

Metalik malzemeler, balistik koruma sistemlerinde hem ana yapısal destek hem de darbe emici katman olarak kullanılmaktadır.

Zırh Çelikleri: Özellikle Hadfield çeliği (yüksek manganlı çelik) ve MIL-A 46100 sınıfı çelikler, yüksek dayanım ve süneklik kombinasyonları sayesinde askeri araç zırhlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Alüminyum Alaşımları: Düşük yoğunlukları ve iyi enerji sönmeme özellikleri nedeniyle, hafif zırh sistemlerinde (özellikle kara ve hava araçlarında) tercih edilirler.

Titanyum Alaşımları: Yüksek özgül mukavemetleri ve korozyon dirençleri nedeniyle özel uygulamalarda (örneğin uçaklarda, VIP araçlarda) kullanılmaktadır. Ancak yüksek maliyetleri kullanım alanını sınırlar.

4.4. Kompozit Zırh Yapıları

Gelişen tehdit çeşitliliği, yalnızca tek bir malzeme ile koruma sağlamayı yetersiz hale getirmiştir. Bu nedenle, çok katmanlı ve hibrit zırh sistemleri geliştirilmiştir.

Tek malzemenin koruması yeterli olmadığında, çok katmanlı kompozit yapılar kullanılır. Bu sistemlerde seramik ön katman mermiyi parçalar, arka katmandaki fiber destekli polimerler ise kalan enerjiyi emer. Katmanlar arasındaki mekanik uyum ve yapışma kalitesi, zırhın etkinliğini belirler. Böylece enerji kontrollü şekilde yayılır ve hasar minimuma iner (Aydın & Demir, 2022) Başlıca yapılar:

Seramik + Kompozit Arkalıklı Sistemler: Ön yüzeydeki seramik tabaka, mermiyi kırarak enerjisini azaltır; arkalıkta bulunan fiber takviyeli kompozit ise kalan enerjiyi emer.

Çok Katmanlı Hibrit Sistemler: Farklı türde malzemelerin (seramik, metal, fiber takviyeli polimer) katmanlar halinde birleştirilmesi ile darbe enerjisinin kademeli olarak absorbe edilmesi sağlanır.

Bu yapıların başarısı büyük ölçüde arayüz davranışlarına bağlıdır. Katmanlar arasındaki yapışma kalitesi ve mekanik uyumluluk, balistik performansı belirleyen kritik faktörlerdir. Enerjinin bir katmandan diğerine verimli şekilde aktarılması, çatlak ilerlemesinin önlenmesi ve darbe enerjisinin kontrollü bir şekilde dağılması hedeflenir.

5. Üretim ve İşleme Yöntemleri

Balistik koruma sistemlerinin etkinliği yalnızca kullanılan malzemelere değil, bu malzemelerin nasıl işlendiği ve üretildiğine

de doğrudan bağlıdır. Balistik performansı artırmak için malzemelerin mikro yapısının ve katmanlı düzeninin kontrollü bir şekilde oluşturulması kritik öneme sahiptir. Bu bölümde, balistik uygulamalar için öne çıkan üretim ve işleme yöntemleri detaylı olarak ele alınmaktadır.

5.1. Sıcak Presleme

Sıcak presleme, özellikle seramik bazlı zırh malzemelerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu süreç, toz halindeki seramiklerin ısı ve basınç altında birleştirilmesi esasına dayanır. Yüksek sıcaklıkta uygulanan basınç, partiküller arası boşlukları ortadan kaldırarak yoğun, gözeneksiz ve mekanik olarak dayanıklı bir yapı elde edilmesini sağlar.

Özellikle alümina (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B_4C) gibi seramiklerin şekillendirilmesinde sıcak presleme oldukça etkilidir. Sıcak presleme sayesinde:

- Gözeneksiz, yüksek yoğunluklu yapılar elde edilir,
- Yüksek kırılma tokluğu ve sertlik sağlanır,
- Balistik darbelere karşı direnç artırılır (Munro, 1997).

Ancak, dezavantaj olarak, büyük boyutlu parçaların üretimi zor ve maliyetli olabilir. Ayrıca karmaşık geometriler için ek işlemler gerekebilir.

5.2. Otoklavla Üretim

Otoklavla üretim yöntemi, lif takviyeli kompozitlerin (özellikle karbon fiber veya aramid takviyeli polimer matrisli kompozitlerin) üretiminde en yüksek kaliteyi sağlayan tekniklerden biridir. Bu yöntem, yüksek sıcaklık ve basınç altında reçine sertleşmesi

(kürlenmesi) ile malzeme oluşturulmasını esas alır. Bu yöntem ile elde edilen kompozitler:

- %60'ın üzerinde lif hacmi oranı ile yüksek mekanik dayanım sağlar,
- < %2 boşluk oranı ile daha düşük gözeneklilik sunar,
- Homojen yapı ve yüksek yüzey kalitesi elde edilir (Mallick, 2007).

Otoklav yöntemi, özellikle hava ve deniz platformlarında kullanılan balistik paneller ile kişisel koruyucu yeleklerin üretiminde büyük öneme sahiptir. Ancak yüksek ekipman maliyeti ve üretim süresinin uzun 66olması dezavantaj oluşturur.

5.3. Katmanlı İmalat Yöntemleri (Additive Manufacturing)

Katmanlı imalat, geleneksel yöntemlerin aksine malzemenin katman katman eklenerek şekillendirilmesini temel alan bir üretim yaklaşımıdır. Son yıllarda, balistik koruma sistemlerinde de katmanlı imalat teknikleri (özellikle 3D baskı) önem kazanmaya başlamıştır. Balistik korumada öne çıkan katmanlı üretim teknikleri şunlardır:

Eriyik Biriktirme Modelleme (Fused Deposition Modeling (FDM)): Termoplastiklerin eritilerek katmanlar halinde biriktirilmesi,

Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering (SLS)): Toz malzemelerin lazer enerjisiyle sinterlenmesi,

Stereolitografi (Stereolithography (SLA)): Sıvı reçinelerin UV ışıkla katılaştırılması.

Katmanlı üretim teknikleri sayesinde:

- Hücresel ve kafes yapılar gibi enerji sönümleyici geometriler üretilebilir,
- Malzeme ve şekil özelleştirme mümkün olur,
- Aynı parça içinde fonksiyonel gradyanlı malzemeler (FGM) üretilebilir (Ngo, Kashani, Imbalzano, Nguyen & Hui, 2018).

Özellikle fonksiyonel gradyanlı malzemeler (FGM) ve hücresel yapılar, katmanlı imalatla üretilebilecek balistik koruma sistemlerinde araştırılmaktadır. Bu teknikler sayesinde hem ağırlık azaltılabilir hem de enerji sönümlene kapasitesi artırılabilir.

Ancak, günümüzde katmanlı imalatla üretilen malzemelerin mekanik özellikleri, geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında henüz tam eşdeğer seviyeye ulaşmamıştır. Bu nedenle özellikle yüksek tehdit seviyelerine karşı koruma için henüz sınırlı uygulama alanı bulmaktadır.

6. Günümüzdeki Zorluklar

6.1. Ağırlık ve Performans Dengesi

Balistik koruma sistemlerinin geliştirilmesinde en temel mühendislik problemlerinden biri, yüksek koruma kapasitesini minimum ağırlıkla sağlama gerekliliğidir. Zırh sistemlerinin hafif olması; özellikle askeri personel ve platformlar için hareket kabiliyeti, hız ve yakıt verimliliği açısından büyük avantajlar sağlar. Ancak, bu durum balistik dayanımın azalması riskini de beraberinde getirir. Geleneksel zırh malzemeleri (örneğin; seramik, metalik alaşımlar ve kompozit yapılar) yüksek mukavemet sunmakla birlikte, genellikle ağırdır. Bu nedenle hem koruma düzeyi yüksek hem de özgül ağırlığı düşük yeni nesil malzemelerin geliştirilmesi kritik bir gereklilik hâline gelmiştir.

6.2. Yüksek Üretim Maliyetleri

İleri düzey balistik malzemelerin üretim süreçleri, hâlihazırda oldukça maliyetlidir. Karbon nanotüpler, grafen ve benzeri nanoyapılar, laboratuvar ölçekli çalışmalarla sınırlı kalmakta; seri üretime uygun, ekonomik süreçlerin eksikliği bu malzemelerin yaygın uygulamasını engellemektedir. Seramik esaslı zırh plakaları da yüksek dayanım sunmalarına karşın, üretim maliyetleri ve işlenebilirlik açısından önemli zorluklar barındırmaktadır. Bu bağlamda, maliyet-etkin üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve bu malzemelerin endüstriyel ölçekte erişilebilirliğinin artırılması, savunma sanayii için öncelikli araştırma alanıdır.

6.3. Malzeme Hibridizasyonu ve Entegrasyonu

Balistik zırh sistemleri çoğunlukla çok katmanlı ve çok fazlı yapıdadır. Seramik, metal ve polimer gibi farklı malzeme türlerinin tek bir yapıda entegrasyonu; hem yapısal dayanım hem de enerji sönmüleme performansını artırma amacı taşır. Ancak, farklı mekanik ve termal özelliklere sahip malzemelerin bir araya getirilmesi, arayüz bölgelerinde çatlama, ayrılma veya zayıf bağlanma gibi problemleri beraberinde getirmektedir. Ayrıca, bu malzemelerin üretim ve işleme süreçlerinin farklılık göstermesi, entegrasyon sürecini mühendislik açısından karmaşıklştırmaktadır.

6.4. Çevresel Dayanıklılık

Zırh sistemlerinin yalnızca balistik tehditlere karşı değil, aynı zamanda çevresel etkilere karşı da uzun ömürlü ve dayanıklı olması beklenmektedir. Aşırı sıcaklık farkları, nem, UV ışınımı, kimyasal maruziyet ve mekanik aşınma gibi faktörler, özellikle polimer esaslı malzemelerde performans kaybına yol açabilir. Bu nedenle, çevresel dayanıklılığı yüksek matris sistemlerinin geliştirilmesi, zırh sistemlerinin operasyonel güvenilirliği açısından büyük önem taşır.

7. İleriye Dönük Araştırma Alanları

7.1. Nano-Malzeme Sistemleri ve Nanoteknoloji

Nanomalzemeler, sahip oldukları yüksek özgül dayanım, geniş yüzey alanı ve enerji sönümleme kabiliyetleri sayesinde balistik koruma alanında büyük potansiyel sunmaktadır. Karbon nanotüpler ve grafen gibi yapıların, özellikle polimer matrisli kompozitlerde takviye edici unsur olarak kullanılması hem yapısal bütünlüğü hem de darbe dayanımını önemli ölçüde artırabilir. Ayrıca, bu tür nanomalzemelerle geliştirilen sistemler, hafiflik ve yüksek performansı birlikte sağlayarak yeni nesil zırhların temelini oluşturabilir. Ancak bu yapılarla ilgili üretim ölçekleme, dağılım homojenliği ve sağlık güvenliği gibi konular hâlâ aktif araştırma konusudur.

7.2. Akıllı ve Adaptif Zırh Sistemleri

Adaptif ve fonksiyonel malzeme sistemleri, tehdit ortamına dinamik şekilde tepki veren zırh sistemlerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Özellikle piezoelektrik, elektro-reolojik ve magnetoreolojik malzemeler kullanılarak; düşük tehdit seviyelerinde esnek, yüksek tehdit durumunda ise sertleşen yapılar geliştirilebilmektedir. Ek olarak, kendini iyileştirebilen (self-healing) polimer yapılar sayesinde zırh sistemlerinin hizmet ömrü artırılabilir. Bu bağlamda, akıllı zırhlar yalnızca koruma değil, aynı zamanda durum farkındalığı ve hasar izleme gibi çok işlevli görevler de üstlenebilir.

7.3. Çok Fonksiyonlu Zırhlar

Günümüzdeki tehdit spektrumu yalnızca kinetik darbelere değil, aynı zamanda ısı, elektromanyetik dalgalar, kimyasal ve biyolojik ajanlara da yöneliktir. Bu nedenle, çok işlevli (multifonksiyonel) zırh sistemleri, entegre sensör teknolojileri, enerji depolama birimleri ve

çevresel direnç özellikleriyle donatılmış olmalıdır. Örneğin, grafen tabanlı yapıların termal iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve mekanik dayanım gibi birçok özelliği bir arada sunması; bu yapıları yeni nesil koruyucu sistemlerde cazip kılmaktadır.

7.4. Yenilikçi Üretim Teknikleri ve Katmanlı İmalat

Katmanlı üretim (additive manufacturing) yöntemleri, özellikle karmaşık geometriye sahip zırh yapıların kısa sürede, düşük maliyetle ve özelleştirilebilir biçimde üretilebilmesine olanak tanımaktadır. 3D baskı teknolojisiyle geliştirilen topoloji optimizasyonlu yapılar, klasik üretim yöntemleriyle elde edilmesi zor olan hafif ama dayanıklı çözümler sunar. Bununla birlikte, bu teknolojilerin balistik uygulamalarda kullanımı henüz sınırlıdır; malzeme dayanımı ve mikro yapısal bütünlük gibi konular üzerine daha fazla çalışma gerekmektedir.

8. Sonuç

Bu çalışmada balistik koruma sistemleri, balistik tehditlerin özellikleri ve bu tehditlere karşı geliştirilen malzemeler çerçevesinde incelenmiştir. Balistik korumanın etkinliği; kullanılan malzemenin sertlik, tokluk, yoğunluk ve enerji sönmüleme kapasitesi gibi mekanik özelliklerine doğrudan bağlıdır. Bu nedenle malzeme bilimi, balistik darbe altındaki davranışların anlaşılması ve performansın artırılması açısından temel bir rol üstlenmektedir.

Günümüzde tek bir malzeme ile yeterli koruma sağlamak çoğu zaman mümkün olmadığından, seramik, metal ve fiber takviyeli kompozitlerin birlikte kullanıldığı çok katmanlı ve hibrit zırh sistemleri öne çıkmaktadır. Bu yapılar, merminin enerjisini kademeli olarak sönmüleyerek hem penetrasyonu engellemekte hem de arka yüzeyde oluşabilecek hasarı azaltmaktadır. Bununla birlikte, ağırlık–performans dengesi, yüksek üretim maliyetleri ve çevresel

dayanıklılık gibi sorunlar balistik malzemelerin geliştirilmesinde hâlen önemli zorluklar oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, balistik koruma sistemlerinin geleceği; hafif, yüksek dayanımlı ve maliyet etkin malzemelerin geliştirilmesine bağlıdır. Nanoteknoloji, akıllı ve çok fonksiyonlu zırh sistemleri ile yenilikçi üretim yöntemleri, bu alanda yapılacak çalışmalar için önemli araştırma ve geliştirme potansiyeli sunmaktadır.

Kaynakça

Candan, C. 2005. Zırh Teknolojilerindeki Gelişmeler. Zırh Teknolojileri Semineri, Ankara, Milli Savunma Bakanlığı Arge ve Teknoloji Daire Başkanlığı.

Yıldız, M. 2020. Balistik malzemeler ve koruyucu yelek teknolojileri. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 19(1), 45–62.

Aydın, H. (2019). Balistik koruma sistemlerinde kullanılan kompozit malzemeler. *Malzeme Bilimi Dergisi*, 7(2), 55-66.

Hazell, P. J. (2015). *Armor: Materials, Theory, and Design*. CRC Press.

Cunniff, P. M. (1996). Dimensionless parameters for optimization of textile-based body armor systems. *Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics*.

Backman, M. E., & Goldsmith, W. (1978). The mechanics of penetration of projectiles into targets. *International Journal of Engineering Science*, 16(1), 1-99.

Demirtaş, E., & Şahin, O. (2021). Balistik koruma sistemlerinde kullanılan ileri malzemeler. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 20(1), 45–62.

Nurick, G. N., Shave, G. C., & Lunt, E. A. (1995). The influence of material properties on energy absorption during low-velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 16(5-6), 795-807

Meyers, M. A. (1994). Dynamic behavior of materials. *John Wiley & Sons*.

Gupta, N. K., Madhu, V., & Sherikar, S. V. (2020). *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*. Springer.

Shockey, D. A., Simons, J. W., & Curran, D. R. (1990). Failure mechanisms of ceramic armor subjected to projectile impact. *Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics*.

Cunniff, P. M. (1996). Dimensionless parameters for optimization of textile-based body armor systems. *Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics*.

Nurick, G. N., Shave, G. C., & Lunt, E. A. (1995). The influence of material properties on energy absorption during low-velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 16(5-6), 795-807.

Demirtaş, M., & Şahin, A. (2021). Aramid liflerinin balistik performans etkileri ve çevresel faktörlerin incelenmesi. *Polimer Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, 7(2), 66–74.

Yılmaz, E. (2019). UHMWPE fiberlerin balistik uygulamadaki avantajları ve sınırlılıkları. *Savunma Sanayii Araştırmaları Dergisi*, 5(3), 98–107.

Aydın, A., & Demir, H. (2022). Kompozit zırh sistemlerinde çok katmanlı yapıların darbe davranışı. *Savunma Teknolojileri Dergisi*, 9(1), 45–58.

Munro, R. G. (1997). Material properties of a sintered alpha silicon carbide. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 26(5), 1195–1203.

Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. CRC Press.

Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196.

BÖLÜM 11

PASLANMAZ ÇELİKLERİN BİYOMALZEME UYGULAMALARI: KAPSAMLI BİR ARAŞTIRMA

NACİ KURGAN¹

Giriş

Biyomalzemeler, insan vücudundaki canlı dokuların işlevlerini desteklemek veya yerine getirmek amacıyla kullanılan doğal ya da sentetik materyallerdir. Bu malzemeler, geçici veya kalıcı olarak vücuda yerleştirilirler ve vücut sıvılarıyla doğrudan temas halindedirler. Tıbbi uygulamalarda insan vücudunun farklı bölgelerinde çeşitli amaçlarla kullanılmalarının yanı sıra biyoteknoloji alanında da önemli rollere sahiptirler. Biyomalzemeler arasında özellikle metalik biyomalzemeler, yüksek mukavemet, kolay şekil alabilirlik ve biyouyumluluk gibi bazı özellikleri nedeniyle biyomedikal uygulamalarda sıkça tercih edilmektedirler. Uygulamalarda en sık kullanılan metalik biyomalzemeler; paslanmaz çelikler, kobalt-krom alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımları ile NiTi alaşımlarıdır (Güven, 2014: 305).

¹ Prof. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-7297-7249

Metal esaslı biyomalzemeler üstün özelliklere haiz olduğu gibi bazı dezavantajlara da sahiptirler. Bu kapsamda, aşınma sonucunda toksik metal iyonları vücuda salınabilmektedir. Paslanmaz çelikler, düşük yorulma dayanımı ve plastik deformasyona yatkınlıkları nedeniyle ortopedik implantlarda kalıcı arızalara yol açabilirler. Kobalt-krom alaşımları kanserojen olabilen iyonlar salma riski taşıırken, titanyumda ise oksit tabakasının aşınmasıyla ortaya çıkan parçacıklar istenmeyen doku tepkilerine neden olabilirler. Bu tür ve benzeri olumsuzluklar, metalik biyomalzemelerin riskler açısından dikkatle değerlendirilmesini ve güçlü-zayıf yönlerinin kapsamlı bir şekilde ortaya konmasının önemini göstermektedir.

Ayrıca, metalik biyomalzemelerde görülen aşınma, korozyon ve yorulma kaynaklı hasarlar çoğunlukla parçaların yüzeyinde ortaya çıkarlar. Bu nedenle üretilen implantların yüzey kalitesi, kullanım performansları açısından kritik bir önem taşımaktadır. Biyomedikal implantlarda beklentiler büyük ölçüde malzemenin yüzey özelliklerine odaklandığından, bir implantın güvenilirliği de esasen yüzey tabakasının fiziksel durumuna bağlıdır. Bu doğrultuda, metalik biyomalzemelerin biyoyumluluğunu ve işlevsel performansını artırmak için imalat sürecinde uygulanan yüzey işlemleri kilit bir rol oynamaktadır (Özdemir, 2021).

Kullanılan biyomalzemeler vücut tarafından tolere edilebilmeli, alerji ya da iltihaplanma gibi olumsuz reaksiyonlara yol açmamalı, uygulandığı bölgede karşılaşacağı kuvvetlere yeterli dayanım göstermeli ve uzun süre bozulmadan kalabilmelidirler. Bu nedenle, biyomalzemelerin güvenlik ve performans özelliklerinin ayrıntılı biçimde araştırılması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, malzemenin özellikleri, cerrahın deneyimi ve hastanın genel sağlık durumu, biyomalzemelerin başarısını doğrudan etkileyen temel faktörler arasında yer almaktadır. (Kumar & arkd,

2020; Manivasagam, Dhinasekaran & Rajamanickam, 2010; Singer, 2023).

Bu çalışmada, metalik implant biyomalzemeler sınıfında önemli bir kullanım alanı bulan paslanmaz çelik biyomalzemeler hakkında ayrıntılı incelemeler yapılmış ve özellikle bu malzemelerin biyoyuymumluluğunu ve mekanik bütünlüğünü (özellikle korozyon yorgunluğu) etkileyen özellikler ayrıntılı olarak ele alınmış ve metalik implant biyomalzemeler için kritik zorluklar, umut verici yaklaşımlar ve stratejiler vurgulanarak özetlenmiştir.

Metalik Biyomalzemeler

Metalik Biyomalzemelerin Tarihsel Gelişimi

Metalik biyomalzemelerin tıbbi implantlarda kullanımı, 19. yüzyıla, yani Sanayi Devrimi sırasında metal endüstrisinin genişlemeye başladığı döneme kadar uzanmaktadır. Metal implantların gelişimi, esas olarak uzun kemiklerin iç kırıklarının fiksasyonu gibi kemik onarımı yaklaşımlarına olan taleple şekillenmiştir. Ancak, 1860'larda Lister'ın aseptik cerrahi tekniği uygulanana kadar, demir, altın veya gümüşten yapılmış omurga telleri ve kemik pimleri gibi metalik cihazların implantasyonuna yönelik neredeyse hiçbir girişim başarılı olmamıştır. (Park & Lakes, 2007:95). O zamandan beri, metalik malzemeler ortopedik cerrahide baskın hale gelmiş ve geçici cihazlar (örneğin kemik plakaları, pimler ve vidalar) ve kalıcı implantlar (örneğin total eklem protezleri) dahil olmak üzere çoğu ortopedik cihazda önemli bir rol oynamıştır. Eş zamanlı olarak, metaller diş dolguları ve kökler de dahil olmak üzere diş hekimliği ve ortodonti uygulamalarında da uygulama bulmuştur. (Mazzocca & ark., 2008; Biehl & ark., 2002: 97).

Endüstride üretilebilen çok sayıdaki metal ve alaşımları olmasına rağmen, bunlardan yalnızca birkaçı biyoyuymuludur ve

implant malzemesi olarak uzun vadeli başarıya ulaşabilmiştir ve ticari olarak satılan ortopedik tıbbi cihazların büyük bir çoğunluğunun bileşenlerini oluşturmuştur. Bu malzemeler, Tablo 1’de verildiği gibi, ana alaşım elementine göre; paslanmaz çelikler, kobalt bazlı alaşımlar, titanyum bazlı alaşımlar ve diğer çeşitli alaşımlar (örneğin NiTi ve Mg ve Ta alaşımları) olmak üzere dört grupta sınıflandırılmıştır (Zberg, Uggowitzer & Loeffler, 2009: 887; Blackwood, 2003: 124).

İlk üç gruptaki metalik malzemelerden yapılmış çeşitli tıbbi implantlar ortopedi pratiğinde rutin olarak kullanılmaktadır. Son gruptaki malzemeler, benzersiz malzeme özellikleri (NiTi'nin şekil hafızası ve Mg alaşımlarının parçalanabilirliği gibi) nedeniyle, potansiyel olarak daha özelleşmiş doku gereksinimlerini karşılayabilmektedirler (Okazaki & Goth, 2008: 3429). Dört metalik biyomalzeme sınıfının klinik uygulamaları ve mevcut durumu Tablo 1’de özetlenmiştir. Şekil 1’de ise, tipik klinik uygulama senaryolarından sadece birisi gösterilmiştir.

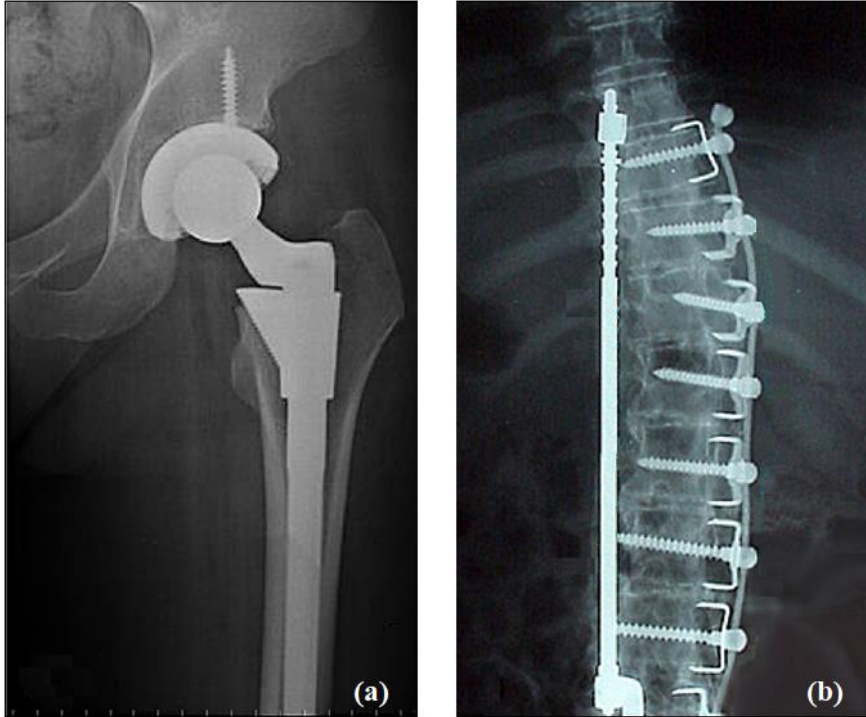
Tablo 1. Dört kategorideki metalik biyomalzemeler ve implant olarak başlıca kullanım alanları

Tür	Başlıca Kullanım Alanları
Paslanmaz Çelikler	Geçici cihazlar (kırık plakları, vidalar, kalça çivileri vb.) Total kalça protezleri
Co-Bazlı Alaşımlar	Total eklem protezleri (dövme alaşımlar) Diş hekimliği dökümleri
Ti Bazlı Alaşımlar	CoCrMo veya seramik femur başlı total kalça protezlerinin stem ve kapları Diğer kalıcı cihazlar (çiviler, kalp pilleri)
Diğerleri	
NiTi	Ortodontik diş ark telleri Vasküler stentler Vena kava filtresi İntrakraniyal anevrizma klipsleri Yapay kalp için kasılabilen yapay kaslar Kateter kılavuz telleri Ortopedik zımbalar
Mg	Biyobozunur ortopedik implantlar

Ta	Plastik cerrahi ve beyin cerrahisi için tel dikişler Radyografik işaretleyici
----	--

Kaynak: Geetha & ark., 2009: 397; Duerig & ark., 1990; Staiger & ark., 2006: 1730; Heublein & ark., 2003: 650; Wong & Bronzino, 2007; Chen & Thouas, 2015

Şekil 1. (a) Genellikle paslanmaz çelik, kobalt veya titanyum bazlı alaşımlardan yapılan total kalça protezinin sapı (b) Paslanmaz çelikten yapılmış bir cerrahi alet olan Harrington çubuğu



Kaynak: Chen & Thouas, 2015

Biyomedikal Malzeme, Biyomalzemeler ve Biyolojik Malzeme Tanımları

Biyomalzemelerin ortak özelliği, canlı vücutla yakın temas halinde kullanılmalarıdır. Malzeme biliminde biyomalzeme, "tek başına veya karmaşık bir sistemin parçası olarak, canlı sistemlerin bileşenleriyle etkileşimleri kontrol ederek herhangi bir terapötik

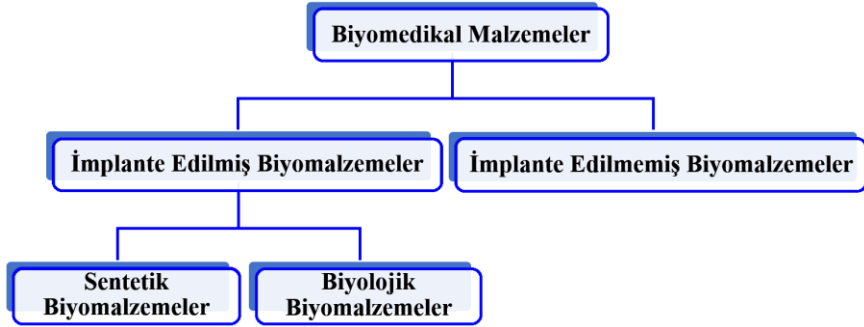
veya teşhis prosedürünün seyrini yönlendirmek için kullanılan bir form alacak şekilde tasarlanmış bir madde" olarak tanımlanmıştır. Başka bir deyişle, biyomalzeme, bir organ veya dokunun bir parçasıyla yakın temas halindeyken, onun yerine geçen veya ona yardımcı olan, doğal veya insan yapımı herhangi bir biyoyumlu malzemedir. Biyomalzemelerdeki "biyo" ön ekinin, genellikle yanlış anlaşıldığı gibi "biyolojik" veya "biyomedikal" yerine "biyoyumlu" anlamına geldiği de unutulmamalıdır (*Chen & Thouas, 2015*).

Ancak biyomalzeme terimi, bilimsel ve hukuki topluluklarda farklı tanımlama sınırları içinde kullanılmaktadır. Hukuk alanında tıbbi cihazlar, "üretici tarafından tek başına veya birlikte, teşhis, önleme, izleme, tedavi, araştırma, yaşamı destekleme veya sürdürme, gebe kalma kontrolü ve tıbbi cihazların dezenfeksiyonu gibi belirli amaçlardan biri veya daha fazlası için insanlarda kullanılmak üzere tasarlanmış herhangi bir alet, aparat, araç, makine, cihaz, implant, in vitro reaktif veya kalibratör, yazılım, malzeme ya da benzeri veya ilgili diğer maddeler" olarak tanımlanmaktadır; biyomalzeme, bir tıbbi cihazın bir bileşeni olarak tanımlanmaktadır. Bu tanıma göre, kontakt lensler ve total kalça protezi için kullanılan malzemeler biyomalzemeler iken, düzeltici gözlükler ve yapay bacak protezleri için kullanılanlar ise, genellikle biyomalzemeler alanında ele alınmayan biyomedikal cihazlardır (*Chen & Thouas, 2015*).

Bu çalışmada geçen "biyomedikal malzeme" kavramı, canlı dokuyla yakın temas halinde olsun veya olmasın uygulanan herhangi bir biyomedikal cihazın bir bileşenini temsil etmek için kullanılmışken, bilim camiasında yaygın olarak kullanılan "biyomalzemeler" tanımı ise, yalnızca canlı dokularla yakın temas halinde kullanılan biyomalzemeleri tanımlamak için kullanılmıştır. Dolayısıyla, biyomalzemeler implante edilmiş biyomedikal malzemelerdir ve bir biyomalzeme, kemik ve pamuk gibi sentetik ya da doğal olarak oluşan bir malzeme olabilir. "Biyolojik malzemeler"

ise, fitri olarak canlı organizmalar tarafından üretilen ve canlı sistemlerin işleyişinde rol alan malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2’de biyomedikal malzemelerin sınıflandırılması gösterilmiştir (Chen & Thouas, 2015).

Şekil 2. Biyomedikal malzemelerin sınıflandırılması



Kaynak: Chen & Thouas, 2015

Metalik Biyomalzemelerin Tasarımında Temel Hususlar

Bir biyomalzemenin tasarımı ve seçimi, özel tıbbi uygulamasına bağlıdır. Uzun süre boyunca güvenli ve uygun bir şekilde reddedilmeden hizmet verebilmesi için, metalik bir biyomalzemenin aşağıdaki temel özelliklere sahip olması gerekir, ancak bunlarla sınırlı değildir. Aşağıda belirtilen temel gereklilikler, metalik biyomalzemelerin tasarımında dikkate alınmalıdır.

- Mükemmel biyouyumluluk (toksik olmayan),
- Yüksek korozyon direnci,
- Uygun mekanik özellikler,
- Yüksek aşınma direnci,
- Osseointegrasyon (kemik protezleri durumunda),

Biyouyumluluk

Bir biyomalzeme canlı dokuyla yakın temas halinde kullanılmak üzere tasarlandığından, implante edilen malzemenin herhangi bir zararlı etkiye neden olmaması esastır. Bu alanda yapılan bilimsel çalışmalar, biyoyumluluğun hücre ve dokuların implante edilen biyomalzemelerle etkileşimi de dahil olmak üzere, biyocihaz işlevinin tüm yönlerini kapsadığını öne sürmektedir (Williams, 2013). Bu biyoyumluluk gereklilikleri karmaşık ve katı olmakla birlikte, belirli tıbbi uygulamalara göre de değişiklik göstermektedir. Örneğin, metalik iyonların toksik salınımı nedeniyle ortopedik bir implantın reddedilmesi, nihai başarısızlığa yol açabilmektedir. Bu nedenle, metalik bir implantın toksik olmayan elementlerden yapılmış olması ve bu nedenle insan vücudunda ölçülebilir inflamatuvar veya alerjik reaksiyonlara neden olmaması beklenmektedir. Ancak ortopedik cerrahide tatmin edici bir şekilde kullanılan bir malzeme, trombojenik özellikleri nedeniyle kardiyovasküler uygulamalar için uygun olmayabilmektedir.

Bazı çalışmalarda, biyomalzemelerin biyoyumluluğu; hücre veya doku ölümüne yol açma (sitotoksosite), kanser oluşumu (karsinojenisite), genetik hasar (mutajenite), bağışıklık tepkileri (pirojenite ve alerjenite) ya da kan pıhtılaşması (trombojenisite) oluşturma yeteneklerine göre de daha ayrıntılı biçimde sınıflandırılabilir (Marois & Guidoin, 2001). Bu nedenle, bir tıbbi cihazın biyoyumluluğu hem kullanılan malzemelerin uyumluluğunu hem de cihazın tasarımını (örneğin geometri, mekanik ve elektriksel kontrol) kapsar. Örneğin, eklem protezlerinin birçok klinik başarısızlığı, malzeme özelliklerindeki sorunlardan ziyade cihazın yetersiz mekanikinden kaynaklanmaktadır (Angelo & ark., 2010).

İmplant malzemelerinin biyoyumluluğu, yalnızca implante edilen malzemenin konakçı fizyolojik sistemle kimyasal

etkileşimlerini (örneğin alaşımların korozyonu ve metal iyonlarının toksisiteleri) değil, aynı zamanda implante edilen malzemenin çevre dokular üzerindeki fiziksel etkilerini de (malzemenin mekanik özellikleri) içerir; ancak ilki daha yaygın ve öncelikli bir endişe kaynağıdır.

Bu çalışmada ifade edilen biyouyumluluk, daha çok malzemelerin biyolojik sistemlerle kimyasal etkileşimleri, biyomalzemelerin fiziksel etkileri ve malzemelerin mekanik özellikleri olarak kategorize edilmiştir. Böylece, daha sınırlı bir kavram kapsamında, metalik bir implant biyomalzemesinin biyouyumluluğu, doğrudan korozyon direnci ve açığa çıkan metal iyonlarının biyolojik etkileri temelinde değerlendirilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada, öncelikle biyomalzeme olarak kullanılan paslanmaz çeliklerin korozyon direnci, alaşım elementlerinin biyolojik rolleri ve ardından alaşımın biyouyumluluğu incelenmiştir.

Metalik İmplant Malzemelerin Korozyon Davranışı

Metalik malzemelerin en büyük problemlerinden birisi korozyondur. Bu nedenle implant malzeme olarak kullanılacak metalik malzemelerin korozyon direncinin oldukça iyi olması arzulanır, zira biyolojik uyumluluk korozyondan direkt olarak etkilenmektedir. İnsan vücudu da malzemelere karşı koroziv bir özellik taşır. Vücut sıvısı sulu karakterde olup, sıcak 0.1 MCl iyonu ve daha başka organik ve inorganik maddeleri içerir. Vücut sıvısının pH derecesi normal durumda 7.4' dür. Fakat enfeksiyon ve travma gibi olaylar 4 ile 9 arasında değişen bölgesel pH değerliklerine sahip olabilir. Vücuda uygulanan biyomalzemelerin değiştirme veya çıkarmaya ihtiyaç göstermeden uzun süre (50 yıl) insan vücudunda kalabilmesi ideal bir durumdur. Böyle bir idealin gerçekleşebilmesi için biyomalzemelerin korozyon hızının çok düşük seviyelere indirgenmiş olması gerekmektedir. (Fındık & Coşar, 2002).

İnsan vücudunun içindeki ortam, fiziksel ve kimyasal olarak ortam koşullarından farklıdır. Normal koşullarda havada iyi performans gösteren (inert veya pasif) bir metal, vücut ortamında ciddi bir şekilde korozyona uğrayabilmektedir. Nitekim, korozyona karşı dayanıklı olan paslanmaz çelikler bile, genellikle konakçı vücutta kronik alerji ve toksik reaksiyonlara neden olurlar ve bunlar ancak implantasyondan sonra yeterince uzun bir süre geçtikten sonra teşhis edilebilmektedir. Korozyon direnci, metalik biyomalzemelerin uzun vadeli başarısını belirlerken, vücudun farklı bölgelerinin farklı pH değerleri ve oksijen konsantrasyonları vardır. Bu nedenle, vücudun bir bölgesinde iyi performans gösteren bir implant, asidik erozyon ve oksidasyon nedeniyle başka bir bölgede kabul edilemez miktarda korozyona uğrayabilmektedir (Brayda-Bruno & ark., 2001).

İnsan vücudunda kullanılan metalik implantların yüzeylerinde oluşan pasif filmler yüzeylerdeki oksitlenme reaksiyonlarını yavaşlatmaktadır. Yıllık 0.1 mm olarak rapor edilen yeknesak korozyon yanında, oyulma ve aralık korozyonları gibi pasif filmin bölgesel hasarı ile oluşan elektrokimyasal korozyon türleri ile bu türlerden etkilenen fretaj, gerilmeli korozyon, korozyonlu yorulma ve hidrojen gevrekliği gibi mekanik korozyon tipleri, implantlarda sık gözlenen diğer korozyonlardır. Koruyucu pasif filmin bölgesel hasarı implantın tamiri imkânsız biçimde tahribi ile sonuçlanmaktadır. Vida-plak, vida-çivi ve modüler kalça protezi gibi durumlarda teşvik edilen bu korozyon türleri, gerilmeli korozyon ve korozyonlu yorulmanın başlangıç noktasını oluşturarak, implantın hizmet dışı kalma süresini kısaltmaktadır (Kurgan, 2005).

Koruyucu film birbirine göre mikro seviyede hareketli iki elemanın ara yüzeyinde fretaj korozyonu ile hasar uğrayabilir. Fretaj korozyonu ile hasara uğrayan pasif filmin yeniden pasiflenmesi, doğal aralık durumundaki bu bölgede oksijen konsantrasyonunda

azalmaya, metal hidroksit oluşumları sonucunda ortam pH'ında düşüşe sebebiyet vererek, aralık korozyonunu harekete geçirecektir. Fretaj ve yeniden pasiflenmenin ardışık tekrarı ile oksijenin tamamen tüketilip, yeniden pasiflenmenin mümkün olamayacağı belirtilerek, fretaj korozyonu davranışlarının metal potansiyelindeki değişimlerin izlenmesi ile ölçülebileceği gösterilmiştir. Hareketli mafsallarda yüzeylerindeki aralık ve fretaj korozyonu davranışlarını, farklı metal kombinasyonlarında aydınlatmak için kapsamlı çalışmalar sürdürülmektedir (Kurgan, 2005).

Yapılan çalışmalarda vida-plak elemanlarında oluşan aralık korozyonunun, elektrokimyasal bir film tahribinden çok, fretaj etkisiyle başladığı sanılmaktadır. Pasif filmin anodik polarizasyon ve/veya plastik deformasyon etkisi ile tahrip olmasının paslanmaz çelik implantlarda gerilmeli korozyon çatlamasına sebep olacağı gösterilmiştir. Gerilmeli korozyon çatlamasına yol açan pasif filmin tahribinin ayrıca fretaj korozyonu ile gerçekleşebileceğine de işaret edilmektedir.

İmplantların performansında korozyonlu yorulma davranışlarının önemi uzun zamandır bilinen bir durumdur. İmplant malzemelerin korozyonlu yorulma özellikleri değişik çalışmalarda ele alınmıştır. Bu çalışmalarda fretajla tahrip olan pasif yüzeylerin, korozyonlu yorulmanın başlangıcını hızlandıracağı hususunda görüşler dile getirilmiştir.

Korozyon olayının bir başka ilginç yönü, mekanik gerilmelerden büyük ölçüde etkilenmesidir. Bu ilişki, mekanik özelliklerin korozyondan etkilenmesi olarak tarif edilebilir. Dış veya içten uygulanan gerilmeler altındaki metallerin korozyonla bozulmalarını, yalnızca elektrokimyasal oluşum düzenleri ile tarif etmek imkânsızdır. Kimyasal, elektrokimyasal yaklaşımların yanında mekanik ve metalürjik ilkeler de kullanılmadıkça günümüz

korozyon sonuçlarına çözüm getirmek mümkün olmamaktadır (Kurgan, 2005).

Vücutta kullanılan metalik protez malzemelerinin, idealde korozyona karşı tamamen dirençli olması gerekliliğine rağmen, cerrahide kullanılan protez malzemelerinde korozyonla karşılaşmaktadır. Yapılan pek çok çalışmalardan sonra daha az korozyona sebep olan saf veya alaşım halindeki malzemelerin kullanılmasına rağmen, korozyon hala günümüzde de önemini yitirecek kadar azaltılmamıştır. Örneğin, protez malzemesi olarak kullanımı halen yaygın olarak devam eden paslanmaz çelik, korozyondan çabuk etkilenen bir yapıya sahiptir ve düzeltilmesi için daha epeyce çaba sarf edilmesi gerekmektedir.

Korozyona uğramayan bir metalin vücut dokusuna olan biyolojik uyumluluğunun korozif bir metale göre çok daha iyi olduğu kesin olarak bilinmektedir. Hasta vücudunda daimi kalması gereken metalik protez uygulamalarının sayısındaki artışa rağmen, henüz kullanılmakta olan protezlerin vücutta kullanılmaya başlanılmasından bazen birkaç yıl gibi kısa bir süre sonra dahi hastada ağrı şikayetleri, yakın dokularda metal zerrelere veya etkileri gibi korozyon belirtileri sergiledikleri görülmektedir. Zamanla protezdeki problemlerin artması ile hastaların önemli orandaki bir kısmında da zorunlu olarak protezin tekrar geri çıkartılması yoluna bile gidilebilmektedir (Kurgan, 2005).

İnsan Vücudundaki Mekanik Çalışma Koşulları

Tatmin edici derecede güçlü ve tok olan kemiğin yerini alabilmek için biyomalzemelerin bu mekanik performansına uyum sağlayabilmesi gerekir. Biyomalzeme geliştirme açısından genel öneme sahip mekanik özellikler arasında elastisite modülü, çekme dayanımı ve tokluk bulunmaktadır. Paslanmaz çelik, kobalt esaslı alaşımlar ve titanyum esaslı alaşımlar olmak üzere üç baskın metalik biyomalzeme için bu mekanik özelliklerin özeti Tablo 2'de

verilmiştir. Bu üç metalik biyomalzeme, yüksek yükleri taşıyabilmeleri ve kırılmadan önce plastik deformasyona uğrayabilme kabiliyetleri nedeniyle, çekme dayanımları ve kırılma tokluklarıyla da gösterildiği üzere, halen yaygın olarak tercih edilmektedirler.

Tablo 2. Metalik implant malzemelerinin ve kortikal kemiğin mekanik özellikleri

Malzemeler	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti MPa)	Kırılma Tokluğu (MPa √m)
CoCrMo alaşımları	240	900-1540	~100
316L paslanmaz çelik	200	540-1000	~100
Ti alaşımları	105-125	900	~80
Mg alaşımları	40-45	100-250	15-40
NiTi alaşımı	30-50	1355	30-60
Kortikal kemik	10-30	130-150	2-12

Kaynak: Long & Rack, 1998

Paslanmaz çelik, kobalt esaslı alaşımlar ve titanyum esaslı alaşımların elastisite modülünün (100 GPa’dan fazla) kemiğin elastisite modülünden (yalnızca 10–30 GPa) çok daha yüksek olduğu bilinmelidir. Bir implantın elastisite modülünün yüksek olması, yükün neredeyse tamamını implantın taşımasına neden olabilir; buna karşılık daha az mekanik yük taşıyan kemik, özellikle implant bölgesi çevresinde atrofi gibi biyolojik tepkilere maruz kalabilir ve bu nedenle daha fazla revizyon cerrahisi gerekebilir. Bu durum “gerilme kalkanı (stress shielding) etkisi” olarak adlandırılır. Bu nedenle, kemiklerin elastisite modülüne yakın elastisite modülüne sahip implantların geliştirilmesi arzu edilmektedir (Long & Rack, 1998).

İnsan vücudundaki mekanik çalışma koşulları karmaşıktır. İnsanlar normalde günde 1 Hz hızında birkaç bin adım atarlar. Bu

nedenle, yapay kalça eklemleri, diz eklemleri, omurga fiksasyonları, plakalar ve teller gibi iskelet kemiği implantları döngüsel yükleme nedeniyle yorulma zorlanmasından muzdariptir. Yapay kalça eklemlerinde, yükleme gerilme seviyesi hastanın vücut ağırlığından birkaç kat daha yüksektir. Bunun nedeni, kalça eklemi bir adım atma sırasında dik konumdan sapmış bir hizadayken, vücut ağırlığının büyük bir kısmının her seferinde yalnızca tek bir bacak üzerinde yoğunlaşmasıdır. Total kalça protezinin sapının kesitine vücut ağırlığının beş katına eşdeğer varsayımsal bir yük uygulanırsa, tek bir bacak üzerindeki yükleme geriliminin ortalama 50 MPa olduğu tahmin edilmektedir. Bir kişinin günde 2×10^3 adım attığı varsayıldığında, 20 yıl boyunca atılan toplam adım sayısının $2000 \times 365 \text{ gün} \times 20 \text{ yıl} \approx 1 \times 10^7$ çevrim olarak hesaplanmaktadır (Tablo 3). Bu tür döngüsel gerilmeler, çiğneme hareketi sırasında dental implantlarda ve miyokardiyal aktiviteye yanıt olarak kalp pili elektrotları gibi kemik dışı doku implantlarında da meydana gelmektedir. Her durumda, döngüsel yükleme, statik ve sabit yüklemeye kıyasla malzeme yorulmasını çok daha etkili bir şekilde arttırmaktadır (Sumita & Hanawa, 2003).

Tablo 3. Bazı implantların tipik yorulma mekanik çalışma koşulları

İmplantlar	Yükleme dayanımı	Yükleme frekansı (Hz)	65 yaşındaki bir hastanın (yani 20 yıllık süre boyunca) yaşamı boyunca maruz kalması beklenen toplam yükleme sayısı
Bağlantı noktaları	Basma ~50 MPa Eğilme ~200 MPa	1	10^7
Kalp pili	Veri mevcut değil	1	10^9
Diş dolguları	Veri mevcut değil	1	10^7

Kaynak: Sumita & Hanawa, 2003

Yorulma dayanımı (yorulma sınırı veya sürekli mukavemet sınırı), bir malzemeye yorulma hasarına yol açmadan uygulanabilecek döngüsel gerilmenin maksimum genliğini (veya aralığını) ifade eder. Yorulma dayanımı, malzemelerin mikro yapısı, ürünlerin yüzey kalitesi ve servis koşulları (örneğin yük vektörleri, döngüsel frekans, aşınma ve korozyon ortamı) ile hassas bir şekilde değişmektedir. Döngüsel yüklemeye maruz kalan bir malzeme, çekme dayanımının ve hatta akma dayanımının oldukça altında gerilme seviyelerinde dahi kırılabilir. Yorulma kırıkları, kopmadan önce herhangi bir uyarı olmadan normal servis koşulları altında meydana geldikleri için çok tehlikelidirler. Gerçekten de, ömürleri boyunca milyonlarca döngüsel deformasyona dayanması beklenen herhangi bir malzemeden üretilen tıbbi cihazlar, yorulma ve kırılma direncinin incelenmesini gerektirirler ve yorulma kırığı, biyomedikal implantlarda erken arızanın ana nedenlerinden biri olarak görülmektedir (Chen & Thouas, 2015).

Yorulma, korozyonla birlikte eş zamanlı olarak meydana geldiğinde, daha da karmaşık bir hale gelebilmektedir. Canlı vücut içerisinde metalik malzemelerin yüzeyinde oluşan aşınma, metal iyonlarının, metalik bileşiklerin ve aşınma artıklarının sürekli olarak açığa çıkmasına yol açar. Bu ürünlerin implantı çevreleyen dokulara salınması, yerel dokularda veya organlarda toksisiteye ve yabancı cisim reaksiyonlarına neden olabilmektedir. Örneğin, klinik ortopedide metallozis olarak adlandırılan ve implantı çevreleyen konak dokunun siyah renge dönüşmesi olgusu, büyük miktarda aşınma artıklarının salınması sonucu ortaya çıkmakta ve nihayetinde aseptik gevşemeye yol açmaktadır (Antunes & Lopes de Oliveira, 2012: 937; Hildebrand & Hornez, 1998: 265).

Yorulmanın korozyonla birlikte ortaya çıkması durumuna, korozyonlu yorulma denir. Korozyonun fretting (mikro sürtünme) yorulmasıyla birlikte gerçekleşmesi ise “fretting korozyon yorulması” olarak adlandırılır. Metalik implant biyomalzemeler,

insan vücudu içerisinde korozyonlu yorulma veya fretting korozyon yorulması nedeniyle hasar görmeye eğilimlidirler. Kısacası, canlı vücudun iç ortamı metalik malzemeler için hem kimyasal hem de mekanik açıdan oldukça zorlu bir çevredir. Ayrıca, cerrahi bıçakların operasyon sırasında kazara çizilmesi sonucu ortaya çıkabilecek implant yüzeylerindeki kusurlar da yorulma dayanımını azaltmaktadır.

Bu çalışmada, biyomalzeme olarak kullanılan paslanmaz çeliklerin malzeme özellikleriyle ilgili istenmeyen faktörlerin kontrol mekanizmaları ele alınmış, ardından alaşımın ve bileşenlerinin biyouyumlulukları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Daha sonra, genel mekanik özellikler, yorulma özellikleri, aşınma direnci ve alaşım sisteminin klinik uygulama sonuçları gibi mekanik özellikler ele alınmıştır. Son olarak da, tıbbi implant olarak kullanılan mevcut paslanmaz çelik metalik biyomalzemelerin doğasında bulunan en zorlu sorunlar ve bu zorlukların üstesinden gelmek için en umut verici yaklaşımlar ve stratejiler belirlenmeye çalışılmıştır (Robertson, Pelton, & Ritchie, 2012: 20).

Biyomalzeme Olarak Paslanmaz Çelikler

M.Ö 1200 civarındaki Demir Çağı'ndan, yani demir metalürjisinin ilk kez öğrenildiği zamandan beri, demirden yapılmış kaplar mutfaklarda yemek hazırlamak ve saklamak için kullanılmıştır. Elementel demirin insan vücudu üzerindeki zararsız doğası tarih boyunca gözlemlenmiş olsa da, metal iyonu toksisitesi daha yakın zamanda incelenmiş ve azalan toksite sırasına göre şu şekilde sınıflandırılmıştır: kobalt > vanadyum > nikel > krom > titanyum > demir.

Paslanmaz çelik, yüksek oranda (%11-30 ağırlıkça) krom ve değişen miktarlarda nikel içeren bir dizi demir bazlı alaşımın genel adıdır. Paslanmaz çelikler, kimyasal bileşimlerine göre krom ve krom-nikel tipleri olmak üzere iki grupta sınıflandırılmıştır.

Alternatif olarak, alaşımların karakteristik mikro yapısına göre de, Tablo 4'de listelendiği gibi martenzitik, ferritik, östenitik ve dubleks (östenitik+ferritik) paslanmaz çelikler olarak da gruplandırılmıştır. Dubleks tipi hariç, diğer üç paslanmaz çelik grubunun her biri tıbbi cihazlarda uygulama bulmaktadır. Martenzitik paslanmaz çeliklerin sertliği (97 HRB'ye kadar), bunları diş ve cerrahi aletler için ideal hale getirmektedir. Ferritik paslanmaz çelikler tıbbi cihazlarda sınırlı sayıda uygulama alanı bulmaktadır. Östenitik paslanmaz çelikler ise iyi korozyon direnci ve orta düzeyde mukavemetin gerekli olduğu çeşitli implant edilemeyen tıbbi cihazlarda kullanılmaktadır. Bu uygulamalar genellikle karmaşık şekillere kolaylıkla dönüştürülebilen malzemeler gerektirmektedir. Bununla birlikte, implantlar için yalnızca östenitik paslanmaz çelikler kullanılmaktadır. Bu nedenle, bu derlemenin bundan sonraki geri kalan kısmı, 316L tipi ve onun türevleri de dâhil olmak üzere implant sınıfı bu paslanmaz çelikler üzerinde yoğunlaşmıştır (Davies, 2003: 45).

Tablo 4. Dört kategori paslanmaz çelik ve tipik tıbbi uygulamaları.

Malzeme Türü	Uygulama Sınıfı	Örnekler
Martenzitik	Diş ve cerrahi aletler	Kemik küretleri, keskiler ve oluk açıcılar, diş frezleri, diş keskileri, küretler, ekspozürler, kök kaldırıncılar ve kazıyıcılar, forsepsler, hemostatlar, retraktörler, ortodontik penseler ve neşterler
Ferritik	Çok sınırlı cerrahi aletler	Aletler için sağlam saplar, kılavuz pimler ve bağlantı elemanları
Ostenitik	Çok sayıda implante edilemeyen tıbbi cihaz	Kanüller, dental ölçü kaşıkları, kılavuz pimler, metal tıbbi kaplar, hipodermik iğneler, buhar sterilizatörleri, depolama dolapları ve çalışma yüzeyleri ile torasik retraktörler
	Birçok kısa süreli implantlar Total kalça protezleri	Bu kısma ait örnekler tablo 8'de verilmiştir.

Dubleks	Biyomedikal alanda henüz uygulanmamıştır.	
---------	---	--

Kaynak: Davies, 2003: 45

Paslanmaz Çeliklerin Alaşım Kimyası ve Korozyon Direnci

Paslanmaz çelikteki minimum krom yüzdesi, kirlenmemiş atmosferde pas oluşumunu önlemek için gereken miktar olan ~ %11 ağırlıkçaadır. Tablo 5’de, 316L (ASMT F138) paslanmaz çeliğin ve çeşitlerinin bileşimleri listelenmiştir. Bunlar, kemik travması sonrasında kırık plakaları, vidalar ve kalça çivileri gibi geçici cihazlarda ve total kalça protezleri gibi kalıcı implantlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Paslanmaz çelikte bulunan krom, oksijene karşı yüksek bir afiniteye sahiptir ve bu durum, yaklaşık ~2 nm kalınlığında, kromca zengin ve gözle görülmeyen bir oksit filminin oluşmasına olanak sağlamaktadır. Bu yüzey tabakası yapışkan niteliktedir ve oksijen varlığında kendini yenileme (self-healing) özelliği göstermektedir. Nikel ilavesiyle korozyon direncinde ilave bir iyileşme ve mekanik özelliklerde geniş bir aralık elde edilmektedir. Nikel, demirde ostenit oluşumunu stabilize eden ve alaşımların yüzeyinde koruyucu oksit filmler oluşturarak artan korozyon direncine katkıda bulunan bir ana alaşım elementidir. Bununla birlikte, nikelin insan vücudu için oldukça toksik olduğu da bilinmelidir (Alvarado, 2003; Navarro & ark., 2008: 1137; Munoz & Costa, 2012: 6).

Tablo 5. 316L paslanmaz çeliğin (ASTM F138) ve türevlerinin kimyasal bileşimleri (% ağırlık)

	Paslanmaz Çeliklerin ASTM Kodu/UNS Numarası			
	F138/S31673	F1314/S20910	F1586/S31675 (Orthinox)	F2229/S29108
Cr	17.00-19.00	20.50-23.50	19.50-22.00	19.00-23.00
Ni	13.00-15.00	11.50-13.50	9.00-11.00	0.10
Mo	2.25-3.00	4.00-6.00	2.00-4.25	21.00-24.00

Mn	2.00	2.00-3.00	2.00-3.00	0.50-1.50
Si	0.75	0.75	0.75	0.75
Cu	0.50	0.50	0.25	0.25
N	0.10	0.20-0.40	0.25-0.50	>0.90
C	0.030	0.030	0.08	0.08
P	0.025	0.025	0.025	0.03
S	0.010	0.010	0.010	0.010

Kaynak: Davies, 2003: 45

Diğer alaşım elementlerinin eklenmesi, belirli korozyon mekanizmalarına karşı direnci artırabilmekte veya istenen mekanik ve fiziksel özellikleri geliştirebilmektedir. Örneğin, molibden kullanımı, güçlendirilmiş bir pasif film oluşumu sayesinde korozyon direncini artırmanın yanı sıra, krom karbür oluşumunun neden olduğu çukurcuk (pitting) korozyonuna karşı direnci de daha da yükseltmektedir. Çukurcuk korozyonu, metallerde küçük deliklerin oluşmasına yol açan, oldukça yerel bir korozyon türüdür. Çukurcuk korozyonunun termodinamik nedeni, pasifliği bozulmuş küçük alanların anodik hâline gelmesi, geriye kalan geniş alanın katodik hâline gelmesi şeklinde açıklanabilir. Malzeme metastabil çukurcuk korozyonu (pitting) potansiyel aralığında bulunduğu, mekanik olarak pasifliği bozulmuş kayma basamaklarının yeniden pasifleşmesi başlamayabilir ve bu aktif bölgelerde yerel galvanik korozyon meydana gelebilir. Bu mekanizma kayma basamağı çözünmesi modeli olarak adlandırılmaktadır (Sonnleitner & ark., 2010: 97).

Kromlu çeliklerde krom, karbonla güçlü bir afiniteye sahiptir ve bu durum özellikle tane sınırlarında olmak üzere karbonca zengin bölgelerde karbür oluşumuna yol açar. Krom karbürlerinin (Cr_3C_2 , Cr_7C_3 ve Cr_{23}C_6) çökmesi, kromun tükenmesine ve dolayısıyla krom karbürleri çevresindeki küçük bölgelerde pasifliğin bozulmasına neden olur. Bunun sonucunda, krom karbürlerini çevreleyen çelik bölgelerinin korozyon direnci azalır. Karbür

oluşturma eğilimi güçlü olan molibdenin eklenmesi ise, molibden karbürleri oluşturarak karbonu etkili bir şekilde hapsedebilir ve böylece krom karbür oluşum seviyesini azaltabilir. 316L paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi, çukurcuk (pitting) korozyon direncini en üst düzeye çıkarmak ve ferrit içermeyen bir mikroyapı sağlamak üzere tasarlanmıştır. Çukurcuk direnci eşdeğeri (PRE), $\%Cr + \%3.3 \times Mo \geq 26$ koşulunu sağlamaktadır. Karbon, çeliklerin dayanımını artırmasına rağmen, korozyon direncini iyileştirmek için karbon içeriğinin azaltılmasının gerekli olduğu unutulmamalıdır. Östenitik çeliklerde karbon genellikle $\%0,03$ 'ten daha düşük oranlarda bulunmaktadır (Tablo 5) (Chen & Thouas 2015).

Aralık korozyonu, çevresindeki sıvının erişiminin sınırlı olduğu dar ve kapalı bir bölgede meydana gelen korozyon türünü ifade etmektedir. Pasifleşebilen alaşımlarda (örneğin paslanmaz çelikler), klorür açısından zengin vücut sıvılarına maruz kalındığında aralık korozyonunun mekanizması; aralık içindeki ortamın giderek asidik hâle gelmesiyle başlar ve bu durum, pasif tabakayı kademeli olarak tahrip eden son derece agresif yerel koşulların oluşmasına yol açar. Aralık korozyonu, kemik vidası başının alt yüzeyi ile kemik plağının havşalı (konik) bölgesi arasında sıkça görülmektedir. Bu süreç, aralık içerisindeki oksijenin tükenmesiyle başlamaktadır. Aralık içinde anot reaksiyonu devam ederken, oksijen konsantrasyonu aralık dışındaki sıvılar tarafından kolaylıkla yenilenememektedir. Bu sırada, anot reaksiyonu sonucu açığa çıkan metal iyonlarının çekimiyle daha küçük klorür iyonları aralık içine doğru hareket etmektedir. Böylece aralık bölgesindeki pH düşer ve bu durum da metalin oksitlenmesini hızlandırmaktadır (Sumita & Hanawa, 2003).

Azot, östenitik paslanmaz çeliklerde nispeten yüksek bir oranda çözünür ve demirin östenitik yapısını stabilize eder. 316L'nin belirli varyantlarında (Tablo 5) nikel yerine kullanılabilir ve mekanik mukavemeti artırmanın yanı sıra çukurlaşma ve aralık korozyonuna

karşı direnci de artırabilir. 1998 yılında, ASTM 1586 (yani Orthinox), total kalça protezinde gövde (sap) malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, yüksek azot içeriğine sahip nikel içermeyen östenitik çelikler (ASTM F2229) de tıbbi kullanım için geliştirilmiştir.

Yukarıdaki alaşım kimyasına ek olarak, implant sınıfı paslanmaz çeliklerin üretilmesi için vakumda ergitme, vakum ark yeniden ergitme veya elektro-cüruf rafinasyonu gibi özel üretim yöntemleri gereklidir. Vakum eritme adımı, çeliklerin temizliğini iyileştirerek, metalik olmayan inklüzyonların miktarını ve boyutunu en aza indirir ve böylece ürünlerde çukurlaşma ve aralık korozyon direnci en üst düzeye çıkarılır. Tip 316L (18Cr–14Ni–2.5Mo), standart tip 316 bileşiminin vakum ergitmeli bir çeşididir. Son olarak, paslanmaz çelik implantların pasifliği, implant sterilize edilip bir sağlık kuruluşuna sevk edilmek üzere paketlenmeden önce nitrik asit ile yapılan pasivasyon işlemiyle artırılır (Diamantino ark., 2000: 253; Rask & ark., 2010: 5089).

Paslanmaz çeliklerin çukurcuk ve aralık korozyonuna karşı direnci, yukarıda belirtilen alaşım kimyası ve metalürjik işlemlerle geliştirilmiş olsa da gerilmeli korozyon çatlaması olarak bilinen korozyon türü bu yöntemlerle önlenememektedir. Gerilmeli korozyon çatlaması, klorür açısından zengin bir ortamda çalışan paslanmaz çeliklerde meydana gelir ve çekme gerilmesi ile aşındırıcı bir ortamın birleşik etkisiyle indüklenir. Bu durum, çekme gerilmesine maruz kalan normalde sünek metallerde beklenmedik ve ani kırılmalara yol açabilmektedir. Gerilmeli korozyona bağlı çatlamanın, artık gerilmeler içeren bir implantta dahi ortaya çıkabilecek şekilde, nihai çekme dayanımından çok daha düşük gerilmeler altında meydana gelebildiği gösterilmiştir.

Kısaca, paslanmaz çeliklerin başarısı bu alaşımların geniş ölçüde kabul görmesini sağlamış olsa da tamamen “lekelenmez veya

korozyona dayanıklı” değildirler. Bu durum, bölüm 2’de açıklandığı üzere yüksek derecede korozif olan insan vücut sıvıları söz konusu olduğunda özellikle geçerlidir. Nitekim, 316L östenitik paslanmaz çelikler implant malzemesi olarak uzun süreli kullanım için yeterli korozyon direncine sahip değildir ve günümüzde uygulamaları, iç fiksasyon veya traksiyon cihazları gibi geçici cihazlarla sınırlandırılmıştır. Bu uygulamalarda, iyileşme gerçekleşikten sonra cihazlar vücuttan çıkarılmaktadır. Günümüzde ise yüksek azotlu paslanmaz çelik Orthinox, kalça protezleri tıbbi pazarında baskın bir sap (stem) malzemesi konumundadır (Mazzocca & ark., 2008; Kamath & ark., 2011: 1520).

Paslanmaz Çeliklerde Kullanılan Alaşım Elementlerinin Biyouyumluluğu

Tablo 5’de listelendiği üzere, 316L paslanmaz çelikte (ASTM F138) ve varyantlarında başlıca alaşım elementleri krom, nikel, molibden ve manganez olup ve bunlara ilave olarak matris elementi demir bulunmaktadır. Çalışmanın bu kısmı, üç baskın element olan demir, krom ve nikelin biyolojik performansına odaklanılmakta olup, bunların biyouyumluluğu, elementlerin çözünür iyonlar veya çözünmez parçacıklar olarak salınımıyla ilişkilidir.

Demir

Demir, ilkel bakterilerden insanlara kadar hemen tüm canlı organizmalarda bulunan gerekli bir eser elementtir. Demir, insan vücudundaki tüm hücrelerde bulunur ve çeşitli hayati işlevlere sahiptir. Demir ayrıca hemoglobin adlı, kandaki oksijeni akciğerlerden dokulara taşıyan demir içeren bir proteinin temel bileşenidir. Metalik implantlardan salınan büyük miktardaki demir, kanda aşırı demir seviyelerine neden olabilir. Kanda yüksek seviyede bulunan serbest ferroz demir, peroksitlerle reaksiyona girerek yüksek reaktivliğe sahip serbest radikaller oluşturur ve bu

radikaller DNA, proteinler, lipitler ve diğer hücresel bileşenlere zarar verebilir. Demir genellikle kalp ve karaciğer hücrelerine zarar vermekte olup, tedavi edilmediği takdirde, şok, karaciğer yetmezliği, erişkin solunum sıkıntısı sendromu gibi vb. hastalıklara ve uzun vadeli organ hasarı ve hatta ölüme yol açabilecek ciddi olumsuz etkilere neden olabilmektedir. İnsanlarda vücut kütlesi başına 20 mg üzeri demir toksisiteye yol açarken, 60 mg/kg ölümcül doz olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda incelenen çalışmalara göre, paslanmaz çelik implantlardan demir salınımına bağlı herhangi bir olumsuz etkiye dair rapor bulunmamaktadır (Umbreit, 2005: 225; Brar & ark., 2009: 371; Esteve & ark., 2012: 176).

Krom

Krom, 6. grup geçiş metalleri arasında yer alır ve elektronik konfigürasyonu $4s^1 3d^5$ 'dir. Eser element olarak krom, kan şekeri düzeylerinin düzenlenmesinde bir kofaktör görevi görür. Krom eksikliği, kan şekeri yüksekliği ve idrarda glukoz ile sonuçlanabilir. Bu nedenle, maruz kalan bireylerde güvenliği izlemek amacıyla kan, plazma, serum veya idrarda krom konsantrasyonları ölçülebilir. Kromun çeşitli olası oksidasyon hallerinden, Cr^{3+} ve Cr^{6+} en yaygın biçimlerdir ve toksisite, metalin oksidasyon durumuna bağlıdır. Suda çözünmeyen trivalan krom (III) bileşikleri ve krom metali, sağlık açısından tehlike sınıfına girmezken, heksavalent krom (VI) toksisitesi ve kanserojenik özellikleri iyi belgelenmiştir (Tsuchiya & ark., 2002:3058; Denizoglu & Duymus, 2006: 365; Meacham & ark., 2003; Dayan & Paine, 2001: 439).

Krom, nikel gibi, vücuda akciğerler, ağız yoluyla alım, cilt teması veya implantlar aracılığıyla alınabilir. Vücuda girdikten sonra, krom (VI) hücrelere girmeden önce kanda krom (III)'e indirgenir. Krom (III) ise idrar yoluyla vücuttan atılır. İn vitro çalışmalar, hücrelerde yüksek krom (III) konsantrasyonlarının DNA hasarına yol açabileceğini göstermiştir. Krom (VI)'nın akut

toksisitesi, güçlü oksitleyici özelliklerinden kaynaklanır. Kana ulaştığında, oksidasyon reaksiyonları yoluyla böbrekleri, karaciğeri ve kan hücrelerini zarar vererek hemolize neden olur; bu durum böbrek ve karaciğer yetmezliği ile sonuçlanabilir. Krom (VI) için ölümcül doz 50–150 mg/kg arasında değişmektedir. Dünya Sağlık Örgütü, maksimum krom (VI) konsantrasyonunu 0,05 mg/l olarak önermektedir (Dubey & ark., 2001: 541; Oliveira & Oliveira-Brett, 2010: 1633; Nickens, Patierno, & Ceryak, 2010: 276; Rudolf & Cervinka, 2009: 236; Berry& ark., 2004: 2981; Segura-Munoz & ark., 2003: 59).

Nikel

Nikelin gerekli bir eser element olarak biyolojik rolü, 1970'lere kadar fark edilmemiştir. Nikel, üre hidrolizine yardımcı olan bir enzim olan üreazda bulunur. İnsan dokularındaki nikel konsantrasyonları, kuru ağırlık başına yaklaşık olarak, akciğerde 173 mg/kg, böbrekte 62 mg/kg, kalpte 54 mg/kg, karaciğerde 50 mg/kg, beyinde 44 mg/kg, dalakta 37 mg/kg ve pankreasta 34 mg/kg değerlerindedir. Kromda olduğu gibi, nikelin toksikolojisi ilk olarak temas alerjisine bağlı dermatitler ile ortaya çıkmıştır; özellikle kulak delme uygulamalarında kullanımı nedeniyle kaşıntılı ve kızarık cilt reaksiyonlarına yol açmıştır. Cilt teması sonrasında, nikel alaşımlarına karşı dermatit ve aşırı duyarlılık reaksiyonları da rapor edilmiştir (Sigel & ark., 2007; Kawamoto & ark., 2011: 296; Zhao & ark., 2009: 177).

Nikel bileşiklerinin, özellikle parçacık formunda, zararlı olabileceği bir mekanizma, hücreler tarafından membranları üzerinden aktif olarak alınmaları (endositoz) ile ilgilidir. Nikel bileşiklerinin endositoz yoluyla alınma yeteneğini artıran bazı özellikler arasında kristal yapısı, negatif yüzey yükü, 2–4 µm boyut aralığındaki partikül büyüklüğü ve düşük çözünürlük bulunmaktadır. Nikelin, kültüre edilmiş kemik hücreleri için zararlı olduğu

gösterilmiştir; ancak, Co ve Ti alaşımlarında kullanılan kobalt veya vanadyuma kıyasla etkisi daha düşüktür. İn vitro testler, kobalt, nikel ve kromun potansiyel olarak kanserojen olabileceğini de göstermiştir. Saf nikelin kas içine veya kemik içerisine implantlanması, şiddetli lokal doku irritasyonu ve nekroza yol açtığı bulunmuştur.

İmplantların korozyonuna bağlı olarak açığa çıkan metal iyonları, uzak organlara göç edebilir ve hücre zarlarını daha kolay geçebilir. Sistemik toksisite, korozyon ürünlerinin birikimi, metabolizması ve ardından konağın bu ürünlere verdiği reaksiyon sonucu oluşabilir. Ayrıca, paslanmaz çelik implant materyallerinin yakınındaki dokularda (116 ve 1200 mg/L) ve bazı uzak organlarda artmış nikel konsantrasyonları bulunmuştur. Enfeksiyon ve implant aşınması veya sürtünmeye bağlı mekanik hasar gibi diğer faktörler de nikel salınımını artırarak implant bölgesinde biriken nikel miktarını yükseltebilmektedir (Hayes, 1997: 371; Pereira & Sousa, 1998: 40; De Souza & De Menezes, 2008: 345; Bruce & Swanson, 2007: 1963).

316L Paslanmaz Çeliğin Biyouyumluluğu

Paslanmaz çeliğin tıbbi implantlarda kullanımı, sitotoksisite değerlendirme standartlarının henüz oluşturulmadığı 1930'lu yıllarda başlamıştır. Bu nedenle, bu döneme ait paslanmaz çeliklerin biyouyumluluğuna odaklanan in vitro veya in vivo çalışmalar neredeyse bulunmamaktadır. Bu alaşımın makul derecede iyi biyouyumluluğu, 1960'lı ve 1970'li yıllarda total kalça protezlerinin erken klinik başarılarıyla ortaya konmuştur. Daha sonraki yıllarda, 316L paslanmaz çeliğin biyouyumluluğuna ilişkin ek kanıtlar, kontrol malzemesi olarak kullanıldığı birçok çalışmada rapor edilmiştir. Genel olarak, 316L paslanmaz çelik nispeten iyi bir biyouyumluluk sergiler; ancak daha yüksek korozyon hızları

nedeniyle, CrCrMo ve titanyum alaşımlarına kıyasla daha az tatmin edici bir düzeydedir (Davis, 2003; Chen & Thouas, 2015).

İmplant Sınıfı Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Genel Mekanik Özellikler

Mekanik özelliklerin çoğu (örneğin akma dayanımı, yorulma dayanımı, nihai çekme dayanımı (UTS) ve uzama), hem alaşım türüne (yani alaşım kimyasına) hem de üretim/işleme yöntemine (yani mikroyapıya) bağlı olarak değişir. Elastik modülü ise bir istisnadır; bu özellik, mikroyapıdan ziyade alaşım türüne göre belirlenir (Tablo 2). İmplantlar için kullanılan paslanmaz çelikler dövme alaşımlardır (yani dövme ve talaşlı imalat ile üretilirler). Tıp 316L paslanmaz çeliğin ve türevlerinin mikroyapıya duyarlı mekanik özelliklerinin bir özeti Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Çubuk veya tel formundaki 316L (ASTM F138) ve türevleri için mekanik gereksinimler

Çelikler	Koşullar	Çekme Dayanımı min/MPa	Akma Dayanımı (%0,2) min/MPa	4D’de Uzama min/%
F138	Tavlanmış Soğuk işlem görmüş Ekstra sert	490 860 1350	190 690	40 12
F1314	Tavlanmış Soğuk işlem görmüş	690 1035	380 862	35 12
F1586	Tavlanmış Soğuk işlem görmüş Sert	740 1000 1100	430 700 1000	35 20 10
F2229	Tavlanmış Soğuk işlem görmüş %10 Soğuk işlem görmüş %20 Soğuk işlem görmüş %30 Soğuk işlem görmüş %40	931 1062 1262 1496 1731	586 786 952 1227 1551	52 37 25 19 12

Kaynak: Davis, 2003

316L paslanmaz çelikler, elastik modül, çekme dayanımı ve kırılma tokluğu açısından kemikten çok daha güçlü olsalar da, klinik uygulama geçmişleri, yük taşıyan bölgelerde kalıcı bir cihaz olarak kullanılmalarının güvenli olmadığını ortaya koymuştur. Bunun nedeni, vücut içindeki mekanik çalışma koşullarının basit basma yüklemesinden çok daha karmaşık olmasıdır. İnsan vücuduna implante edilen metalik biyomalzemeler genellikle yorulma hasarına maruz kalırlar; bu hasar korozyonlu yorulma veya fretting korozyon yorulması şeklinde de ortaya çıkabilmektedir (Teoh, 2000: 825).

Yorulma zellikleri

Paslanmaz elik implantların yorulma davranışı üzerine yapılan çalışmaların sayısı, kobalt ve özellikle titanyum esaslı alaşımlar üzerine yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça azdır (Tablo 7). Bunun nedeni, östenitik paslanmaz çeliklerin kullanımının, uzun dönemli implantlarda vücut sıvıları içindeki zayıf korozyon dirençleri nedeniyle geçici cihazlarla sınırlı olmasıdır; çünkü bu tür implantlardan evre dokulara zararlı iyonlar salınabilmektedir (Teoh, 2000: 825; (Mazzocca & ark., 2008: 82; Muller & ark., 2005: 6962).

Tablo 7 ve şekil 3’de verilen veriler birlikte değerlendirildiğinde, 316L paslanmaz çeliklerin tuzlu çözeltilerde (salin ortamda) hava ortamına kıyasla daha düşük yorulma dayanımına ve daha kısa yorulma ömrüne sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, biyolojik sulu çözeltilerde 316L paslanmaz çeliğin yorulma dayanımının tipik olarak 200–300 MPa aralığında olduğu anlaşılmaktadır. Belirtmeye değer bir husus olarak, sonlu elemanlar analizine göre vücut içindeki femoral sapta oluşan maksimum çekme gerilmesinin yaklaşık 200 MPa olduğu hesaplanmıştır (Hussam, 2002). Bu nedenle, döküm ve dövme 316L paslanmaz çelikler yorulma özellikleri açısından orta derecede güvenilir kabul edilebilirler. Buna ek olarak, yorulma çatlağı başlangıcının, gerilme yığılması oluşturan ve yorulma çatlaklarının tercihli olarak başlatıldığı bölgeler olan çukurların varlığı ile ilişkili

olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, molibden ve azot, östenitik paslanmaz çeliklerin çukurlaşma (pitting) korozyon direncini artırdığından, bu tür elementlerin eklenmesi, Şekil 3. (b)'de gösterildiği gibi paslanmaz çelik implantların korozyonlu yorulma direncini iyileştirmenin etkili bir yolu olacaktır (Lin & ark., 2007: 2582; Singh & Dahotre, 2007: 725; Ebara, 2010: 1129).

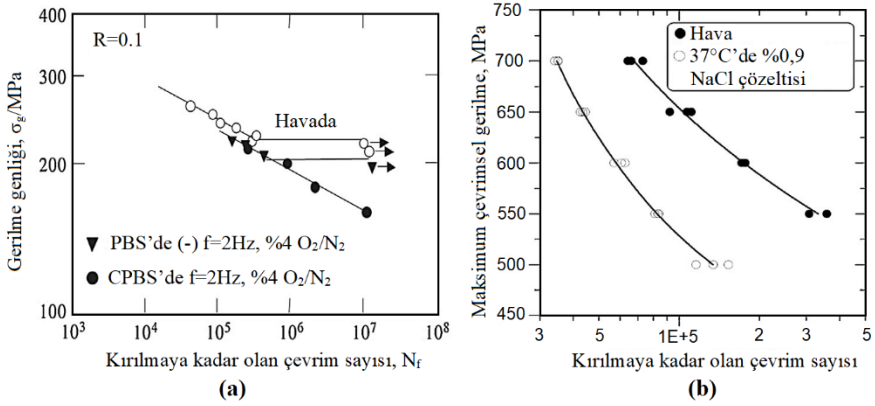
Tablo 7. 316L paslanmaz çeliklerin (ve F1586/S31675'in) yorulma özellikleri (10^6 veya 10^7 çevrimde kırılma olmaksızın (run-out) durdurulan deneyler)

Alaşımlar	Havadaki YY Yorulma Dayanımı/Frekans	Çözelti Ortamındaki Yorulma Dayanımı/Frekans	R
Döküm / Dövme 316L	~200 (pürüzsüz, çentiksiz) /20 Hz	~200 (pürüzsüz, çentiksiz, PBS ortamında) /2 Hz	-1
Soğuk şekillendirilmiş 316LVM	-	~300 (çentikli, Ringer çözeltisi içinde) /1 Hz	0.053
		~550 (pürüzsüz, çentiksiz, Ringer çözeltisi içinde) /1 Hz	
Soğuk şekillendirilmiş 316LVM	<600 (pürüzsüz, çentiksiz) /10 Hz	<600 (pürüzsüz, çentiksiz, %0,9 ağırlıkça NaCl çözeltisi içinde) /10 Hz	0.0
Soğuk şekillendirilmiş 316LVM	~340 (çentikli) /120 Hz	<340 (çentikli, Ringer çözeltisi içinde) /120 Hz	0.1
Tavlanmış 316L	~290 (çentikli)/120 Hz	<290 (çentikli, Ringer çözeltisi içinde) /120 Hz	0.1
Tavlanmış 316L	-	<400 (pürüzsüz, çentiksiz, SBF ortamında) / 1 Hz	-1
Tavlanmış 316L	-	<460 (pürüzsüz, çentiksiz, SBF ortamında) / 1 Hz	-1
ISO5832-9	<550	<500 (pürüzsüz, çentiksiz, %0,9 ağırlıkça NaCl çözeltisi içinde) / 10 Hz	0.01

PBS: fosfat tamponlu çözelti SBF: simüle edilmiş vücut sıvısı

Kaynak: Giordani & ark., 2004: 1129; Maruyama & ark. 2011: 2222; Minto & ark., 2011; Roach, Williamson & Zardiackas, 2007; Weldon & ark., 2005: 107; Rao, Singh & Singhal, 2012: 224).

Şekil 3. (a) Simüle edilmiş vücut sıvısının (SBF'nin) döküm 316L paslanmaz çeliğin S-N ilişkisi üzerindeki etkisi [159]. (b) %0,9 ağırlıkça NaCl çözeltisinin, düşük nikel içerikli, yüksek azotlu paslanmaz çeliğin yorulma özellikleri üzerindeki etkisi



Kaynak: Kaynak: Giordani & ark., 2004

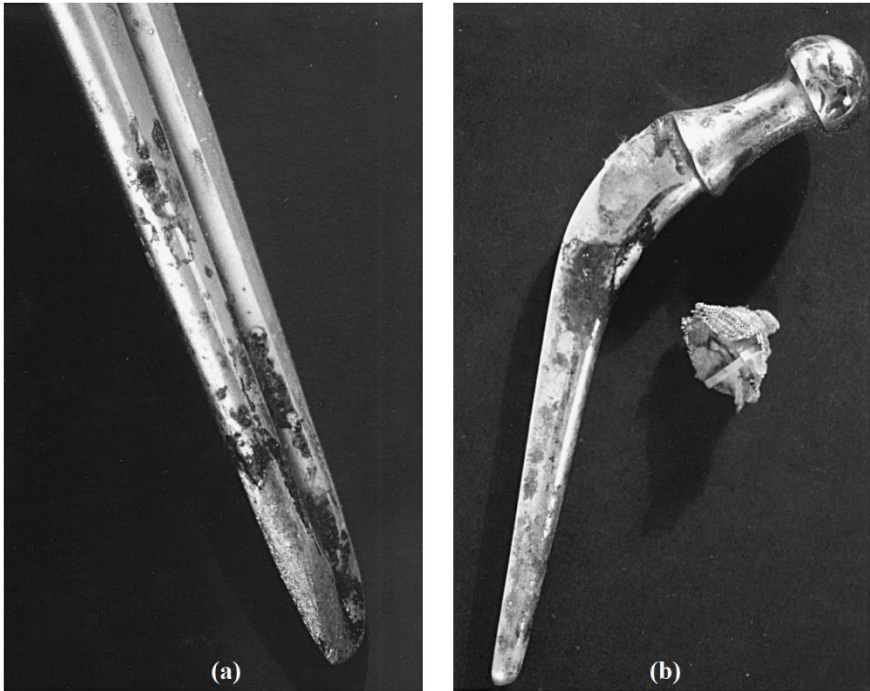
Paslanmaz Çeliklerin Medikal Uygulamaları

316L paslanmaz çeliklerin uzun süreli implant cihazlarında kullanımının başarısı, modern ortopedik Total Kalça Artroplastisi (TKA) prosedürünün gelişimine öncülük eden Sir John Charnley'in çalışmalarına dayanmaktadır. Charnley'in tasarımı; paslanmaz çelikten tek parça bir femoral sap ve baş; bir polietilen asetabular bileşen ve PMMA kemik çimentosu olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır. Bu tasarım, 1970'li yıllara gelindiğinde çok sayıda TKA operasyonunun gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Ancak femoral sap kırığı insidansının, 316L paslanmaz çelikte Co-alaşımına kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür.

Hasar analizleri, saplarda meydana gelen tüm kırıkların yorulma tipi olduğunu ve bu kırıkların sap malzemesindeki kusurlardan başladığını ortaya koymuştur. Paslanmaz çelik kalça implantlarının başlangıçtaki klinik başarısı, bu tür implantların daha uzun yaşam beklentisine sahip daha genç bir hasta grubuna da uygulanmasına yol açmıştır. Ancak, 1990'lı yıllarda bu cihazların

aseptik gevşeme nedeniyle başarısız olduğuna dair çalışmalar ve raporlar ortaya çıkmıştır. 9–21 yıllık kullanım süresinden sonra çıkarılan protezlerin hasar analizleri, implantın sapının (Şekil 4) veya başının yüzey tabakasında korozyon meydana geldiğini göstermiştir. Bu durumun periprostetik metallozis ve hızlı hasar ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. 1970–1990 yılları arasındaki gerçekleştirilen klinik TKA uygulamaları, 316L paslanmaz çeliklerin kalça eklemlerinde implant malzemesi olarak uzun süreli kullanım için yeterli korozyon direncine sahip olmadığını tutarlı bir şekilde ortaya koymuştur (Pospula, 2004: 250; Allain & ark., 2003: 825; Tavares & ark., 2010).

Şekil 4. (a) İmplant çıkarıldıktan sonra bir Muller tipi paslanmaz çelik sapında çukurlaşma ve korozyon (b) bir Charnley tipi paslanmaz çelik sapı üzerinde korozyon tabakası



Kaynak: Chen & Thouas, 2015

316L paslanmaz çelikler; yorulma ve korozyona karşı zayıf dirençlerine ilave olarak, gerilmeli korozyon çatlağı, düşük aşınma direnci ile açığa çıkan nikel ve kromun toksisitesi ve kanserojenliği de dâhil olmak üzere, uzun vadeli başka sorunlara da sahiptirler. Bu nedenle 316L paslanmaz çelikler, kalıcı implantlarda; yüksek azotlu paslanmaz çelik varyantları (örneğin Orthinox), Co-alaşımları ve Ti alaşımları gibi korozyon ve yorulma direnci daha yüksek alaşımlar ile yer değiştirmiştir. Günümüzde 316L paslanmaz çelikler kalıcı implant cihazlarında nadiren kullanılmaktadır. Bununla birlikte, paslanmaz çeliklerin düşük maliyeti; iç kırık tespiti ve omurga traksiyonu, kemik vidaları, kemik plakları, intramedüller çiviler ve çubuklar gibi çok sayıda geçici cihazda kullanımının sürdürülmesini sağlamıştır. Ayrıca, 316L paslanmaz çeliğin düşük maliyeti nedeniyle yüksek azotlu 316L paslanmaz çelik varyantları da geliştirilmiştir. Tablo 8, paslanmaz çeliklerin implant edilebilir cihazlardaki çeşitli uygulamalarını listelemektedir (Davis, 2003; Mazzocca & ark., 2008; Kamath & ark., 2011: 1520).

Table 8. Paslanmaz çeliklerin medikal uygulamaları

Malzemeler	Cihazlar	Uygulamalar
Tip 316L paslanmaz çelik	Kemik vidaları ve pimleri	Kortikal kemiğin diyafiz kırıklarının, süngerimsi kemiğin metafiz ve epifiz kırıklarının iç fiksasyonu; altıgen veya Phillips girintili vida başlığı, dişli şaft ve kendinden kılavuzlu veya kılavuzsuz uçtan oluşan vidalar
Tip 316L paslanmaz çelik	Onlay kemik plakları	Şaft ve mandibular kırıkların internal fiksasyonu: vidaları tutmak için yuvaları veya delikleri olan ince, dar plaklar
Tip 316L paslanmaz çelik	Bıçak ve çivi kemik plakaları	Ağırlık taşıyan kemiklerin uçlarına yakın kırıkların iç fiksasyonu: tek parça veya çok bileşenli plaka ve çivi
Tip 316L paslanmaz çelik	Intramedüller kemik çivileri	Uzun kemiklerin internal fiksasyonu: tüp veya solid çivi
Orthinox paslanmaz çelik	Total eklem protezleri	Metal ve plastik bileşenlerle total eklemlerin değiştirilmesi (omuz, kalça, diz, ayak bileği ve ayak baş

		parmağı): humerus, femoral (kalça ve diz), talus ve metatarsal bileşenler
Tip 316L paslanmaz çelik	Teller	Kemik parçalarının iç gerilim bandı telleri veya parçalı veya dengesiz şaft kırıkları için çevresel serklaj
Tip 316L paslanmaz çelik	Harrington omurga enstrümantasyonu	Düzeltilme kuvvetlerinin uygulanması ve tedavi edilen segmentlerin sabitlenmesiyle skolyoz tedavisi: çubuk ve kancalar
316 ve 316L paslanmaz çelik	Mandibular tel örgü protezler	Kısmen rezeke edilmiş mandibulanın primer rekonstrüksiyonu
304, 316 ve 316L paslanmaz çelik	Dikişler	Yara kapatma, dudak ve damak yarığı onarımı, kraniyoplasti sırasında tel örgü sabitleme, alt çene ve fitik onarımı ve hizalanması, tendon ve sinir onarımı
316 ve 316L paslanmaz çelik tipleri	Orta kulak onarımı için üzenge protezleri	Çalışmayan üzenge protezlerinin değiştirilmesi: tel ve piston veya tel ve çanak pistondan oluşan çeşitli tipler (sentetik flor içeren reçine/paslanmaz çelik piston, platin ve paslanmaz çelik çanak piston ve tüm paslanmaz çelik protezler)
17-7PH, 17-7PH (Nb), PH-15-7Mo ve 301, 304, 316, 316L, 420 ve 431 tipi paslanmaz çelikler	Nöroşirürjik anevrizma ve mikrovasküler klipsler	İntrakraniyal kan damarlarının geçici veya kalıcı olarak oklüzyonu için kullanılır; yaklaşık 2 cm veya daha kısa uzunlukta, tek parça halinde ya da çene, pivot ve yay bileşenlerinden oluşan (benzer veya farklı bileşimlerde) çeşitli konfigürasyonlara sahip gerilim klipsleri

Kaynak: Davis, 2003

Paslanmaz Çeliklerle İlgili Güncel Sorunlar ve Zorluklar

Paslanmaz çeliğin, birkaç aydan birkaç yıla kadar kısa süreli bir cihaz olarak kullanılması, hasar veya arızaların kesin olarak önleneyeceği anlamına gelmemektedir; zira 316L paslanmaz çeliklerin

ortopedik implantlarda erken başarısızlıklarına dair çalışmalar bulunmaktadır (Şekil 5). Hasar veya arıza oluşma zamanı, implantasyondan sonra birkaç ay ile birkaç yıl arasında değışebilmektedir. Gerçekleşen bir çalışmada, yedi adet 316L implant üzerinde yapılan hasar analizleri, kırılmaların yorulma hasarına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. İncelenen implantların çok zayıf yüzey kalitesine sahip olduğu ve yorulma çatlaklarının, işleme kusurlarının ve aralık korozyonunun bulunduğu bölgelerden başladığı görölmüşür. Bilindiği üzere, malzemelerde yorulma çatlakları genellikle malzeme yüzeyinden başlar ve ilerleyerek hasara neden olur. Bu nedenle, 316L paslanmaz elik implantlarda yorulma hasarının; esasen malzeme bilimi ve mühendisliğinden ziyade bir kalite kontrol meselesi olan, yüksek düzeyde yüzey kalitesi veya nitrüleme gibi yüzey işlemleri ile önlenebileceği öngörülmektedir (Tavares & ark., 2010; Mudali, Sridhar & Raj, 2003: 601; Mudali & ark., 2003: 231).

Şekil 5. Bir insan vücudu içindeki hasar görmüş paslanmaz elik implantın radyografik görüntüsü.



Kaynak: Kaynak: Tavares & ark., 2010.

Daha da önemlisi, yüksek azotlu Orthinox'un kalça eklemi implantlarının saplarında ~%10 oranında erken kırılmalar da rapor edilmiştir (Şekil 6) . Kırılma bölgeleri daima sapın orta kısmı civarındadır ve bu bölge, sapın distal kısmındaki en yüksek gerilmenin olduğu bölgedir.

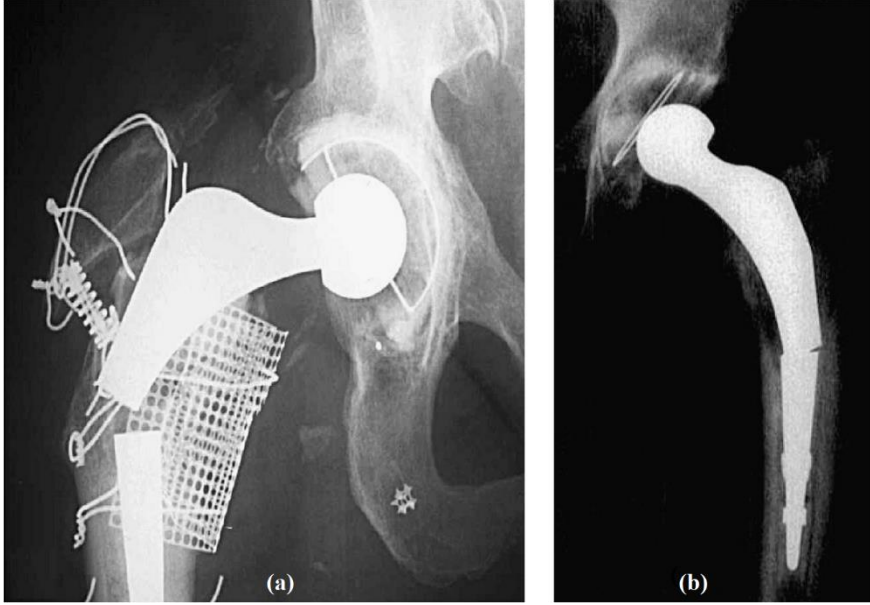
Kırık yüzeylerinin incelenmesi, hasarın nedeninin gerçekten yorulma olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla, Orthinox kalça protezlerinde sap kırılmasının başlıca nedeninin eğilme yorulması olduğu sonucuna varmak makul görünmektedir (Hussam, 2002; Reigstad & ark., 2008: 194; van Doorn & ark., 2002).

Nikel iyonlarının insan vücudu üzerindeki olumsuz etkileri, tıbbi uygulamalar için yüksek azotlu, nikel içermeyen östenitik paslanmaz çeliklerin geliştirilmesini teşvik etmiştir. Bu alaşımlarda azot, östenitik yapının kararlılığını sağlamak üzere nikeli ikame etmekte ve aynı zamanda çeliğin genel yapısal özelliklerini iyileştirmektedir.

Kararlı östenitik yapı, yüksek mukavemet, iyi plastik şekil değiştirme kabiliyeti, korozyon ve aşınmaya karşı daha iyi direnç ile hâlen yaygın olarak kullanılan 316L paslanmaz çeliğe kıyasla üstün biyouyumluluk gibi avantajları bir araya getiren yüksek azotlu, nikel içermeyen paslanmaz çelikler (örneğin, F2229) daha iyi bir alternatif olabilmektedir.

Ancak, yüksek azot içeriğinin alaşımları daha gevrek hâle getirebilmesi nedeniyle, bu alaşımların tokluğunun artırılması, hâlâ araştırılması gereken bir konu olarak görülmektedir (Yang, Ren & Wan, 2012: 329; Yang & Ren, 2010: 014105; Vera Villamil Jaimes & ark., (2010).

Şekil 6. (a) 3 yıl sonra kırılmış Exeter sapı. Graft, küçük trokanterin distalinde kaynaşma (entegrasyon), proksimalinde ise rezorpsiyon göstermektedir. (b) 8.6 yıl sonra sap kırılması. Endosteal kemik lizisi sapın proksimal yarısını çevrelemektedir. Sap, kısmen çimento içinde, kısmen de distal çimento kılıfı ile birlikte 1.6 cm çökmüştür.



Kaynak: Reigstad & ark., 2008: 194; van Doorn & ark., 2002

Sonuçlar

Östenitik paslanmaz çelikler; bulunabilirlikleri, düşük maliyetleri, mükemmel üretilebilirlik özellikleri, kabul edilen biyouyumlulukları ve toklukları nedeniyle implant uygulamaları için popülerliklerini korumaktadırlar ve en uygun dayanım ve süneklik için geniş bir aralıkta kontrol edilebilir mekanik özelliklere sahiptirler. Bununla birlikte, 316L paslanmaz çelik implantlar, çukurlaşma, çatlak korozyonu, korozyon yorulması, sürtünme korozyonu, gerilmeli korozyon çatlak ve vücut içindeki galvanik korozyon nedeniyle çoğu zaman bozulabilmektedirler. 316L östenitik paslanmaz çeliğin aşınma direnci de nispeten düşüktür ve

aşınma sonucu ortaya çıkan parçacıkların çevre dokuda alerjik reaksiyonlara yol açması, bu malzemelerin kalıcı implantlarda kullanımını sınırlayan bir diğer nedendir. Günümüzde 316L paslanmaz çelikler, maliyet tasarrufları nedeniyle çeşitli cerrahi aletlerde ve kısa süreli implant cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu durumun belirsiz bir süre daha devam etmesi muhtemeldir. Bununla birlikte, paslanmaz çeliğin kalıcı kalça protezlerinde sap malzemesi olarak öncü rolü, yüksek azotlu, nikel içermeyen paslanmaz çeliklerin geliştirilmesiyle sürdürülmüştür.

Kaynakça

Güven, Ş. Y. (2014). Biyouyumluluk ve Biyomalzemelerin Seçimi, Süleyman Demirel Üniversitesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2(3), 303-311.

Özdemir, E. (2021). *Metalik Biyomalzemeler ve İmplant Uygulamaları*. İstanbul: Artikel Akademi.

Kumar, S., Nehra, M., Kedia, D., Dilbaghi, N., Tankeshwar, K. & Kim, K. H. (2020). Nanotechnology-based biomaterials for orthopaedic applications: recent advances and future prospects. *Materials Science and Engineering: C*, 106, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110154>

Manivasagam, G., Dhinasekaran, D. & Rajamanickam, A. (2010). Biomedical implants: corrosion and its prevention-a review. *Recent Patents on Corrosion Science*, 2(1), 40-54. <https://doi.org/10.2174/1877610801002010040>

Singer, H. (2023). Metalik Biyomalzemelerin Değerlendirilmesinde Risk Temelli Bir Karar Modeli Önerisi (Doktora Tezi). Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Park, J. B., Lakes, R. S. (2007). *Biomaterials: An Introduction*. New York: Springer

Mazzocca, A. D., De Angelis, J. P., Caputo, A. E., Browner, B. D., Mast, J. W. & Mendes, M. W. (2008). Principles of internal fixation. Philadelphia: W.B. Saunders Company,

Biehl, V., Wack, T., Winter, S., Seyfert, U. T., Breme, J. (2002). *Biomol. Eng.* 19, 97-101.

Zberg, B., Uggowitzer, P. J., Loeffler, J. F. (2009). *Nat. Mater.* 8, 887–891.

Blackwood, D. J., (2003). *Corros. Rev.* 21, 97-124.

- Okazaki, Y., Goth, E. (2008). *Corros. Sci.* 50, 3429-3438.
- Geetha, M., Singh, A. K., Asokamani, R. & Gogia, A. K. (2009). *Prog. Mater. Sci.* 54 397-425.
- Duerig, T. W., Melton, K. N., Stockel, D. & Wayman, C. M. (1990). *Engineering Aspects of Shape Memory Alloy*. London: Butterworth-Heinemann.
- Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J. & Dias, G. (2006) *Biomaterials* 27, 1728-1734.
- Heublein, B., Rohde, R., Kaese, V., Niemeyer, M., Hartung, W. & Haverich, A. (2003). *Heart* 89, 651–656.
- Wong, J. Y. & Bronzino, J. D. (2007). *Biomaterials*. New York: CRC Press.
- Chen, Q. & Thouas, G. A. (2015). Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering R*, 87, 1-57
- Williams, D. (2013). *Med. Device Technol.* 10, 10–13.
- Marois, Y. & Guidoin, R. (2001). *Biomedcial Applications of Polyurethanes*. Texas: Landies Bioscience.
- Angelo, F. D., Murena, L., Vulcano, E., Zatti, G. & Cherubino P. (2010). *Hip Int.*, 20, 81–86.
- Fındık F., Coşar M. (2002). Biyomedikal Uygulamalarda Metalik Malzeme Seçimi. *Makine ve Metal Teknolojisi Dergisi*, 129, 32-40.
- Brayda-Bruno, M., Fini, M., Pierini, G., Giavaresi, G., Rocca, M. & Giardino, R. (2001). *Int. J. Artif. Organs*, 24. 41–49.
- Kurgan, N. (2005). T/M Paslanmaz Çelik İmplantların Üretimi ve Teknolojik Özellikleri Üzerine Bir Araştırma (Doktora Tezi). Kütahya: Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Sumita, M. & Hanawa T. (2003). *Bioengineering*, vol. 9. London: Elsevier Science Ltd.

Long, M. & Rack, H. J. (1998). Titanium alloys in total joint replacement a materials science perspective. *Biomaterials* 19, 1621–1639.

Antunes, R. A. & Lopes de Oliveira, M.C. (2012). *Acta Biomater.* 8, 937–962.

Hildebrand, H. F. & Hornez, J. C. (1998). *Metals as Biomaterials*. Chichester: Wiley & Sons.

Robertson, S. W., Pelton, A. R., Ritchie, R. O. (2012). *Int. Mater. Rev.* 57 1-36.

Davis, J. R. (2003). *Handbook of Materials for Medical Devices*. Ohio: ASM International, Materials Park.

Alvarado, J., Maldonado, R., Marxuach J. & Otero R. (2003). Biomechanics of Hip and Knee Prostheses. *Applications of Engineering Mechanics in Medicine*, University of Puerto Rico Mayaguez.

Navarro, M., Michiardi, A., Castan˜o, O. & Planell, J. A. (2008). *J. R. Soc. Int.* 5 1137–1158.

Munoz, A. & Costa, M. (2012). *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 260. 1–16.

Sonnleitner, R., Mori, G., Panzenboeck, M. & Fluch, R. (2010). *Mater. Corros.* 61, 97–104.

Diamantino, T. C., Guilhermino, L., Almeida, E. & Soares, A. (2000). *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 45, 253–259.

Rask, F., Mihic, A., Reis, L., Dallabrida, S. M., Ismail, N. S., Sider, K., Simmons, C. A., Rupnick, M. A., Weisel, R. D., Li, R. -K. & Radisic, M. (2010). *Soft Matter.*, 6, 5089–5099.

Kamath, A. F., Voleti, P. B., Kim, T. W. B., Garino, J. P. & Lee, G. - C. (2011). *J. Arthroplast.*, 26, 1520–1526.

Umbreit, J. (2005). *Am. J. Hematol.*, 78, 225–231.

Brar, S., Henderson, D., Schenck, J. & Zimmerman, E. A. (2009). *Arch. Neurol.*, 66, 371–374.

Esteve, C., Alcaide, E. & Urena, R. (2012). *Aquat. Toxicol.*, 109, 176–184.

Tsuchiya, T., Ikarashi, Y., Uchima, T., Doi, H., Nakamura, A., Ohshima, Y., Fujimaki, M., Toyoda, K., Kobayashi, E., Yoneyama, T. & Hamanaka, H. (2002). *Mater. Trans.*, 43, 3058–3064.

S. Denizoglu, Z.Y. Duymus, Dent. (2006). *Mater. J.*, 25, 365–370.

Meacham, S.L., Cizdziel, J., Sadik, A., McFadden, G. & Buffalo, A. (2003). *FASEB J.*, 17, A706–A706.

Dayan, A. D. & Paine, A. J. (2001). *Hum. Exp. Toxicol.*, 20, 439–451.

Dubey, C.S., Sahoo, B. K. & Nayak, N. R. (2001). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 67, 541–548.

Oliveira, S. C. B. & Oliveira-Brett, A. M. (2010). *Anal. Bioanal. Chem.*, 398, 1633–1641.

Nickens, K. P., Patierno, S. R. & Ceryak, S. (2010). *Chem. Biol. Interact.*, 188, 276–288.

Rudolf, E. & Cervinka, M. (2009). *Toxicol. Lett.*, 188, 236–242.

- Berry, W. J., Boothman, W. S., Serbst, J. R. & Edwards, P. A. (2004). *Environ. Toxicol. Chem.*, 23, 2981–2992.
- Segura-Munoz, S. I., Trevilato, T. M. B., Takayanagui, A. M. M., Hering, S. E. & Cupo, P. (2003). *Arch. Latinoam. Nutr.*, 53, 59–64.
- Sigel, H. Sigel, A. & Sigel, R. K. O. (2007). *Metal Ions in Life Sciences*, New York: John Wiley & Sons.
- Kawamoto, T. & ark., (2011). *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 214, 296–304.
- Zhao, J., Shi, X., Castranova, V. & Ding M. (2009). *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.*, 28, 177–208.
- Hayes, R. B. (1997). *Cancer Causes Control*, 8, 371–385.
- Pereira, M. C., Pereira, M. L. & Sousa, J. P. (1998). *J. Biomed. Mater. Res.*, 40, 40–47.
- De Souza, R. M. & De Menezes, L. M. (2008). *Angle Orthod.*, 78, 345–350.
- Bruce, I. & Swanson, C. E. (2007). *Spine*, 32, 1963–1968.
- Teoh, S. H. (2000). *Int. J. Fatigue*, 22, 825–837.
- Muller, R. & ark., (2005). *Biomaterials*, 26, 6962–6972.
- Hussam, E. F. S. (2002). Finite element simulation of Hip joint replacement under static and dynamic loading, (Doctor of Philosophy). Dublin City University, School of Mechanical and Manufacturing Engineering.
- Lin, D. -J. & ark., (2007). *Biomaterials*, 28, 2582–2589.
- Singh, R. & Dahotre, N. B. (2007). *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 18, 725–751.

- Ebara, R. (2010). *Fatigue Procedia Engineering*, vol. 2, London: Elsevier,
- Giordani, E. J., Guimaraes, V. A., Pinto, T. B. & Ferreira, I. (2004). *Int. J. Fatigue*, 26, 1129–1136.
- Maruyama, N. D. & ark., (2011). *Corros. Sci.*, 53, 2222–2227.
- Minto, B. W. & ark., (2011). *Acta Vet. Scand.*, 53, 1–6.
- Roach, M. D., Williamson, R. S. & Zardiackas, L. D. (2007). *Fatigue and Fracture of Medical Metallic Materials and Devices*, 1481, West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- Weldon, L. M. & ark., (2005). *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 16, 107–117.
- Rao, S. G., Singh, V. & Singhal, L. K. (2012). *Mater. Sci. Eng. A*, 538, 224–230.
- Pospula, W. (2004). *Kumait Med. J.*, 36, 250–255.
- Allain, J. & ark., (2003). *J. Bone Joint Surg. Am.*, 85, 825–830.
- Tavares, S. S. M. & ark., (2010). *Eng. Fail. Anal.*, 17, 1246–1253.
- Mudali, U. K., Sridhar, T. M. & Raj, B. (2003). *SADHANA*, 28, 601–637.
- Mudali, U. K. & ark., (2003). *Corros. Rev.* 21 231–267.
- Reigstad, O., Siewers, P., Rokkum, M. & Espehaug, B. (2008). *Acta Orthop.*, 79, 194–202.
- van Doorn, W. J., van Biezen, F. C., Prendergast, P. J. & Verhaar, J. A. N. (2002). *Acta Orthop. Scand.*, 73, 111–113.
- Yang, K., Ren, Y., & Wan, P. (2012). *Sci. China Technol., Sci.*, 55 329–340.

Yang, K. & Ren, Y. (2010). Nickel-Free Austenitic Stainless Steels for Medical Applications. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 11, 014105–014118.

Vera Villamil Jaimes, R. F. & ark., (2010). *Mater. Lett.*, 64, 1476–1479.

BÖLÜM 12

ALÜMİNYUM MALZEMELERİN KAYNAKLA BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNE GENEL BAKIŞ

1. BERKAN KARAKAYA¹
2. İBRAHİM KARAAĞAÇ²
3. MEHMET YASİN DEMİREL¹
4. ZÜBEYDE BAŞDOĞAN³

Giriş

Alüminyum alaşımları düşük özgül yoğunluğu, kolay işlenebilirliği ve yüksek korozyon direnci gibi avantajlarından dolayı havacılık ve otomotiv gibi endüstriyel alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu alaşımlar kalıcı ve güçlü birleştirme sağlamak, hafif ve yüksek dayanımlı yapılar oluşturmak amacıyla kaynak yapılabilir. Alüminyum alaşımı serilerinden 1xxx ve 5xxx serileri çok iyi kaynaklanabilirken, 3xxx, 4xxx ve 6xxx serileri orta

¹ Türk Havacılık Uzay Sanayii A.Ş. (TAI), 6980, Ankara, Türkiye, 0009-0001-8444-2871

² Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye, 0000-0001-6727-3650

¹ Dr., Türk Havacılık Uzay Sanayii A.Ş. (TAI), 6980, Ankara, Türkiye, 0000-0002-4244-8562

³Abidinpaşa Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, 6620, Ankara, Türkiye, 0000-0002-0486-1663

derecede kaynaklanabilirliğe sahiptir. Diğer taraftan 2xxx ve 7xxx serileri ise yüksek mukavemetli olsalar da içerdiği bakır ve çinko nedeniyle kaynak sırasında çatlama ve kırılma riski taşıdığından zor kaynaklanmaktadır. Alüminyumun malzemenin kaynak işlemi; alaşımın yapısı, kalınlığı ve kullanım alanına bağlı olarak farklı metotlarla yapılabilmektedir.

Kullanılan başlıca kaynak metotları tungsten inert gaz (TIG) kaynağı, metal inert gaz / metal aktif gaz (MIG/MAG) kaynağı, direnç kaynağı, lazer kaynağı, elektron ışını kaynağı ve sürtünme kaynağı (FSW) olarak sıralanmaktadır. En yaygın alüminyum kaynak yöntemlerinden biri TIG kaynağı olup yüksek kaliteli, temiz ve kontrollü kaynak dikişi oluşturmaktadır. Koruyucu gaz (Ar, He veya CO₂) kullanılarak kaynak bölgesi oksitlenmeden korunmaktadır. Kontrollü ısı girişi deformasyon oranını azaltmaktadır. Ancak kaynak hızı düşük olduğu için seri üretime uygun değildir. Özellikle 6061 alaşımları kaynaklarında TIG kaynağı tercih edilmektedir (Mehdi and Mishra 2021). MIG/MAG kaynağı, yüksek kaynak hızı ve verimliliğe sahip, yarı otomatik ve otomatik sistemler için uygun bir kaynak yöntemidir. Özellikle otomotiv ve imalat sanayinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Diğer bir kaynak metodu olan direnç kaynağı, parçaların temas yüzeyleri arasından geçen elektrik akımı ile ısı oluşturularak yapılan kaynak yöntemidir. Seri üretim için uygundur, enerji tasarrufu sağlamaktadır ve ısıl etkisi düşüktür. Ancak yüksek ekipman maliyeti gerektirmektedir. Otomotiv, beyaz eşya ve mutfak gereci imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Lazer kaynağında yüksek yoğunluklu lazer ışını kullanılarak, hızlı ve dar kaynak dikişleri oluşturulmaktadır. Isıl girdisi düşüktür ve yüksek hız avantajı sağlamaktadır. Ancak kaynak bölgesinin temizliği çok kritiktir ve ekipman yatırım maliyeti yüksek olduğundan özellikle uzay endüstrisinde ince ve hassas parçaların birleştirilmesinde tercih edilmektedir. Elektron ışın kaynağında ise vakum ortamında

elektron ışınının kinetik enerjisi kaynak bölgesine odaklanmaktadır. Derin kaynak nüfuziyeti ve yüksek kaliteli kaynak dikişleri sağlamaktadır. Bu kaynak tipi uzay ve savunma endüstrisinde kullanılmaktadır ancak vakum gereksinimi nedeniyle seri üretime uygun olmamaktadır. FSW kaynağı, katı haldeki malzemelerin dönen bir takım ile sürtünme yöntemiyle birleştirildiği bir kaynak türüdür. Alüminyum alaşımları için ideal, düşük deformasyonlu ve yüksek dayanımlı kaynak sağlamaktadır. Ancak yüksek doğrulukta kontrol ve özel ekipman gerektirmektedir. Özellikle 6xxx ve 7xxx serisi yüksek mukavemetli alaşımlarda yaygın kullanılmaktadır (Association 1984),(Perander 2021), (Vijayan, Subramanian et al. 2021).

Bu çalışmada, literatürde yer alan ve çeşitli endüstrilerde sıklıkla kullanılan 6061-6061, 7075-7075 ve 6061-7075 AA çiftlerinin kaynaklanabilirliği, kullanılan kaynak yöntemleri, kaynak parametreleri, proses sonrası muayene ve test işlemleri, elde edilen çalışmalardan sonuçlar derlenmiştir.

Alüminyum Alaşımlarında TIG Kaynağı Uygulamaları

TIG kaynağı, kaliteli ve sağlam bağlantılar elde etmek için endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilen bir kaynak yöntemidir. Alüminyumun ısıya duyarlılığı ve oksit tabakasının oluşturduğu zorluklara çözüm sunan bu teknik, kontrollü ısı girdisi sayesinde dayanıklı ve kaliteli kaynaklar sağlamaktadır. Bu nedenle otomotiv ve havacılık gibi hassas işçilik gerektiren sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde Alüminyumda kullanılan TIG kaynağı ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar derlenmiştir.

6061 alaşımları; mekanik özellikleri, korozyon direnci, işlenebilirliği ve kaynak yapılabilme yetenekleri sayesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Korozyon direnci nedeniyle özellikle denizcilik ekipmanları ve hidroelektrik makinelerinde, bina

konstrüksiyonları, köprü parçaları gibi taşıyıcı elemanlarda kullanılmaktadır. Üstün mekanik özellikleri nedeniyle otomobil ve bisiklet parçaları ve hafif araç komponentleri gibi uygulamalarda da yaygın kullanıma sahiptir. Benzer olarak 7075 alaşımı ise üstün mukavemeti ve iyi yorulma dayanımı sayesinde uçak yapılarında, iniş takımlarında ve diğer kritik yapısal komponentlerde kullanılmaktadır.

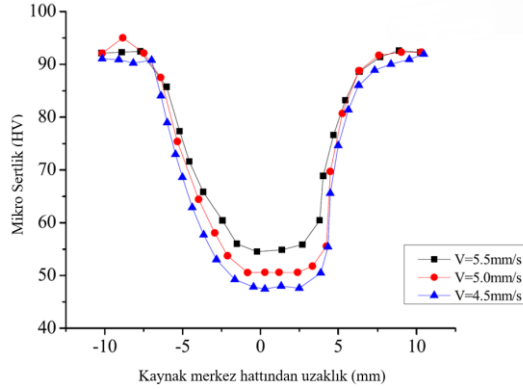
Ishak vd. çalışmalarında, 2 mm kalınlığındaki 7075 ve 6061 AA çiftini, Mg açısından zengin ER5356 ve Si açısından zengin ER4043 dolgu telleri kullanarak TIG kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve dolgu tellerinin alüminyum alaşımlarının kaynağına etkisini incelemişlerdir. 50 A kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. ER5356 dolgu teli kullanılan kaynak bağlantısı, ER4043 dolgu teli kullanılarak yapılan kaynak bağlantısına kıyasla daha iyi bir kaynak dikişi sergilemiştir. ER5356 dolgu teli kullanılarak yapılan kaynak 1,74 mm derinliğe nüfuz ederken, ER4043 dolgu telinin nüfuz derinliği 0.9 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca ER4043 kullanılan kaynak bölgesinde, deformasyon ve çatlak gibi kusurlar gözlemlenmiştir. Kaynakta ER5356 dolgu maddesi kullanımı, ER4043'e kıyasla daha yüksek sertlik değeri göstermiştir. ER5356 dolgu telinin içeriğinde bulunan Mg bileşenin etkisiyle, 7075-6061 AA çiftinin TIG kaynağı ile birleştirilmesinde daha uygun olduğu belirtilmiştir (Ishak, Noordin et al. 2015).

Wang vd. çalışmalarında, 2 mm kalınlığındaki 7075 AA çiftini ER5356 dolgu teli kullanarak TIG kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve sadece erime bölgesine (FZ) kısmi sıcak haddeme (PHR) uygulayarak malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimlerini incelemişlerdir. 120 A kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. FZ'deki mikro yapının heterojen olması, kaynak bölgesinin şekillendirilebilirliğini ve mukavemetini

olumsuz etkilemiştir. PHR işlemi ile FZ döküm yapısının, ince taneli ve deforme yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir, Ana metalin (BM) ile mikro yapı ve mekanik özellik farklılıkları azalmıştır. PHR sonrası kaynaklı bölgede şekillendirilebilirliğinin 2.3 kat arttığı gözlemlenmiştir. PHR sonrası T6 ısıtma işlemi, kaynak bağlantılarının çekme dayanımı BM'nin %81.7'si seviyesine kadar geldiği tespit edilmiştir. Isıl işlem sonrası, ikinci faz parçacıklarının çözünmesi ve tane küçülmesi ile daha dengeli ve güçlü bir mikro yapının elde edildiği ancak FZ bölgesi hala mekanik zayıflığın en yoğun olduğu bölge olarak vurgulanmıştır (Wang, Zhang et al. 2023).

Kumar vd. çalışmalarında, 2 mm kalınlığındaki 6061 AA çiftini butt kaynak şeklinde TIG kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve kaynak hızının mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. 30 A kaynak akımı, 4.5-5.5 mm/s kaynak hızı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. 4.5 mm/s 'de tane büyüklüğü yaklaşık 25 μm iken, 5.5 mm/s'de yaklaşık 15 μm 'ye düşmüştür. Bu tane küçülmesinin, kaynak hızının artmasıyla ısıtma girdinin azalmasına bağlı olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kaynak hızı arttıkça kaynak bölgesinde tane boyutunun küçülmekte olduğu ve bu durumun da mikro sertliğin artmasına yol açtığı belirlenmiştir. Ancak kaynak hızının artması ise kaynak dikişinin çekme dayanımının azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir (Kumar, Arif et al. 2021). Çalışmada ölçülen sertlik dağılımı Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1 Enine kesit boyunca mikro sertlik dağılımı



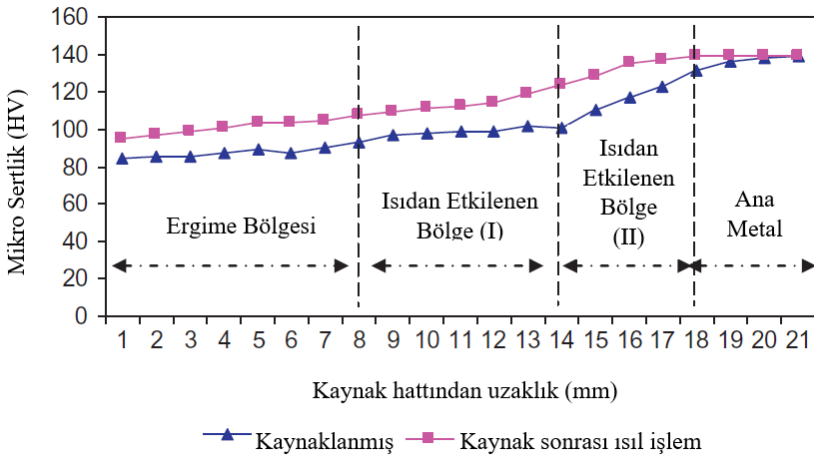
Kaynak: (Kumar, Arif et al. 2021)

Kaba vd. çalışmalarında, 2.5 mm kalınlığındaki 2024-T3 ve 7075-T6 AA çiftini ER5356 dolgu teli kullanarak çift tungsten elektrotlu TIG ark kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar kaynağın mekanik özelliklerini ve mikro yapısını incelemişlerdir. Koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Çift tungsten elektrotlu TIG kaynağı yöntemi ile stabil bir ark oluşmakta ve kaynak dikişi kaliteli, mikroskobik kusursuz bir biçimde elde edilmiştir. Farklı malzemelerin kaynağı için uygun bir yöntem olduğu ve kalitesini olumlu etkilediği tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde (WZ) sertleştirici fazların erimesi nedeniyle sertlik ortalamasının 96 HV'ye düştüğünü, ısıdan etkilenen bölgede (HAZ) oluşan θ (Al_2Cu), S (Al_2CuMg) ve η ($MgZn_2$) fazları mikro sertliği arttırdığını, 7075 alaşımının HAZ'ında sertlik 125 HV'ye çıktığını gözlemlemişlerdir. Ancak bu sertleşme, kaynak bölgelerindeki mekanik dayanım azalmasını telafi edememiştir ve kaynak bölgesinde çekme dayanımı 7075 ve 2024 AA'larında BM'ye göre sırasıyla %44 ve %37 azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir (Kaba, Djeghlal et al. 2022).

Yaşlandırma işleminin kaynağa etkisinin incelendiği çalışmada, Temmar vd. 2.5 mm kalınlığındaki 7075-T6 AA çiftini

tek pasolu TIG kaynağı ile kaynatmışlardır. Kaynak sonrası yaşlandırma işlemi uygulayarak yaşlandırmanın mekanik özelliklere olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında 100 A–140 A kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır, kaynak işlemi tek taraflı olarak ve kaynak sonrası yaşlandırma işlemi 140 °C sıcaklıkta, 10 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Yaşlandırma sonrası kaynağın dayanımının 248 MPa'dan 268 MPa'a yükseldiği gözlemlenmiştir. Yaşlandırma işleminin, alaşımın sertliğinde ve mukavemetinde iyileşme sağlayarak kaynaklı bağlantıların mekanik performansını artırdığı tespit edilmiştir (Temmar, Hadji et al. 2011). Isıl işlem uygulanmış parçaların kaynak işlemindeki sertlik değişimi Şekil 2’de verilmiştir.

Şekil 2 Kaynak öncesi ve kaynak sonrası ısıl işlem birleştirmelerin bölgelere göre mikro sertlik dağılımı



Kaynak: (Temmar, Hadji et al. 2011)

Çevik, 3 mm kalınlığındaki 7075-T651 AA çiftini herhangi bir ilave metal kullanmadan TIG kaynağı yöntemiyle kaynatmış mikro yapısal özelliklerini, darbe dayanıklılığını ve kaynak kusurlarını incelemiştir. 60 A, 80 A, 100 A kaynak akımları, koruyucu gaz olarak ise saf Ar gazı kullanmıştır ve çalışmada kaynak

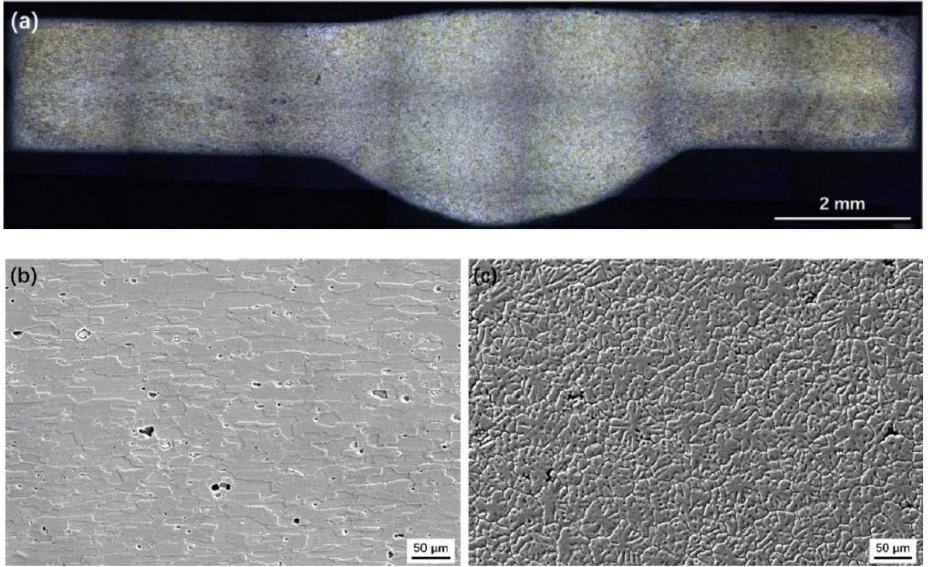
işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak akımının artmasına bağlı olarak sertlik değerinin değiştiği ve ısıdan etkilenen bölgelerdeki sertliğin, kaynaklanmayan metalin sertliğine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 100 A akımla kaynaklanmış numunede en düşük darbe dayanımı 24 kJ/m² iken, kaynaklanmayan metaldeki darbe dayanımının 197 kJ/m² olduğu belirlenmiştir. Kaynak dikişindeki tane irileşmesi ve mikro çatlakların kaynaklı numunenin darbe dayanımını olumsuz etkilediği ortaya konulmuştur (Çevik 2018).

Ji vd. çalışmalarında, 3 mm kalınlığındaki 6061-T6 AA çiftini ER6061 dolgu teli kullanarak tam kaynak ve tek geçişli olmak üzere iki farklı TIG kaynak yöntemleriyle kaynatmışlardır. Çalışmada 240 A kaynak akımı kullanmışlardır. BM çekme dayanımı 223 MPa ve uzama %11.84 iken tam kaynak yönteminde çekme dayanımı 115MPa ve uzama %6.44 olarak ölçülmüştür. Bunun yanı sıra tek geçişli kaynak yönteminde çekme dayanımı 77.32 MPa ve uzama %3.66 en düşük değerleri tespit edilmiştir. BM sertlik değeri yaklaşık 91 HV, tam kaynak yönteminde ise kaynak metali (WM) 70 HV ve HAZ 58 HV'dir. Tek geçişli kaynak yönteminde WM 80 HV ve HAZ 73 HV'dir. Tam kaynak işlemi, tek geçişli kaynağa göre hem mekanik dayanım hem de şekil değiştirme kabiliyeti açısından daha üstün performans göstermiştir, ancak her iki kaynak yöntemi de ana metalden düşük dayanım ve uzama değerleri sergilemiştir (Ji, Hu et al. 2023).

Kang vd. çalışmalarında, 3 mm kalınlığındaki 7075 AA çiftini 7075 Al dolgu teli kullanarak TIG kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve kaynak sonrası uygulanan ısıl işlemin (PWHT) mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. 125 A kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Isıl işlemde katı çöktürme 480°C'de 1 saat, yaşlandırma 120°C'de 24 saat uygulanmıştır. Kaynak sonrası FZ'de sertlik 107 HV iken PHWT

sonrası 134 HV yükseldiği gözlemlenmiştir. Akma, çekme dayanımı ve uzama kaynak sonrası sırasıyla 223 MPa'dan 435 MPa'a, 374 MPa'dan 533 MPa'a ve %4.6'dan %7.8'e yükselmiştir. Kaynak sonrası uygulanan PWHT ile BM'ye %93,8 güçlük katsayısı (strength coefficient) ile yaklaşılmıştır. PWHT sonrası özellikle erime bölgesi Şekil 3'de verilmiştir ve ısı etkilenmiş bölgede GP zonları ve η' fazlarının çökmesi sayesinde sertlik, dayanım ve süneklik önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir (Kang, Zhang et al. 2024).

Şekil 3 7075 Al alaşımı kaynağının makro yapısı ve mikro yapısı: a- kesitsel makro yapı, b-BM ve c-FZ SEM görüntüleri



Kaynak: (Kang, Zhang et al. 2024)

Xiao vd. çalışmalarında, 5 mm kalınlığındaki 7075 AA çiftini sprej formda 7075 AA dolgu malzemesi kullanarak TIG kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve ısıl işlem uygulamışlar. Kaynak bölgesinin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini ısıl işlem öncesinde ve sonrasında incelemişlerdir. 160 A-180 A kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak

işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak akımı 160 A'den 175 A'ye arttıkça, çökelti fazlarının alan oranının (AF) da %6.4'ten %8.8'e arttığı, ancak 180 A'de kristalleşme kusurlarının belirginleşip AF'nin azaldığını tespit etmişlerdir. Buna bağlı olarak düşük kaynak akımında mikro yapıdaki ince tane yapısı ve yüksek rekristalizasyon oranı nedeniyle mekanik özelliklerin iyileştiği gözlemlenmiştir. Ancak akımın artmasıyla birlikte kaynak dikişinde tanecik büyümesi ve kristalleşme kusurlarının arttığı ve mekanik özelliklerin olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir. Isıl işlem öncesinde, kaynak bağlantısının çekme dayanımı 545 MPa'dan 274.84 MPa'a, uzama ise %8'den %6.3'e azalırken, ısıl işlemden sonra çekme dayanımı 511.75 MPa'a, uzama %13.76'ya yükselmiştir. Isıl işlemin, mikro yapıdaki η (MgZn_2), S (CuMgAl_2) ve T (AlZnMgCu) çökeltilerin çözünmesini sağlayarak tane yapısını iyileştirdiği böylece kaynak bağlantısının mekanik özelliklerinin iyileşmesinde etkili olduğu ortaya konulmuştur (Xiao, Chenyang et al. 2023).

Umer ve Tiamiyu çalışmalarında, 6 mm kalınlığındaki 6061-T651 AA çiftini ER4043 dolgu teli kullanarak TIG kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve kaynak bölgesi çevresinde oluşan yumuşamanın mekanik özelliklere olan etkisini incelemişlerdir. 220 A kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak sonrası yumuşamanın, akma dayanımını 298 MPa'dan 122.6 Mpa'a, çekme dayanımını 363 MPa'dan 181 MPa'a, darbe tokluğunu 1.28J'den 0.82J'ye ve özellikle yumuşamaya daha yatkın olan HAZ2'de sertlik değerini 120 HV'den 54-64 HV'ye düşürdüğü tespit edilmiştir. Yumuşamanın daha kalıcı ve yaygın bir mukavemet azalmasına neden olduğu, bu nedenle de çatlamların çoğunlukla yumuşayan HAZ2 bölgesinde başladığı gözlemlenmiştir (Umer and Tiamiyu 2025).

Reyaz vd. çalışmalarında, 6 mm kalınlığındaki 7075-T6 ve 6061-T6 AA çiftini ER5356 dolgu teli kullanarak darbeli-TIG (P-

TIG) kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve tepe akımı ile darbe frekansının mekanik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. 110 A-175 A tepe akımı, 4-16 Hz darbe frekansları koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi iki taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. 110 A akımı ve 4 Hz darbe frekansında tane boyutunu 30.56 μm iken 175 A akımı 16 Hz darbe frekansında 21 μm olduğu tespit edilmiştir. 110 A ve 175 A akım değerlerinde çekme dayanımı, sertlik ve uzama miktarı sırasıyla 138 MPa, 79 HV, %5.2 ve 201 MPa, 101 HV, %16.8 olduğu gözlemlenmiştir. Alaşım elementlerinin homojen yapıda kaynak oluşturması ile kaynak bağlantısının mekanik özelliklerinin iyileştiği ispat edilmiştir (Reyaz, Sinha et al. 2024).

Fouad vd. çalışmalarında, 6 mm kalınlığındaki 7075 AA çiftini ER5356, ER4043 ve ER4047 dolgu telleri kullanarak TIG kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve dolgu tellerinin alüminyum alaşımlarının kaynağına etkisini incelemişlerdir. Sabit kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. ER5356, ER4043 ve ER4047 dolgu tellerinde çekme dayanımları sırasıyla 387.8 MPa, 337.53 MPa ve 297.94 MPa, akma dayanımları sırasıyla 305 MPa, 278 MPa ve 249 MPa, uzamaları sırasıyla %6.5, %8.3 ve %5.65, kaynak verimlilikleri sırasıyla %72, %62.7 ve %55.3, sertlik değerleri sırasıyla yaklaşık 110 HV, 100 HV ve 85 HV olarak ölçülmüştür. ER5356 teli kullanıldığında daha ince yapıli taneler oluştuğu, bunun sonucunda daha yüksek kaynak kalitesi ve mekanik performans elde edildiği tespit edilmiştir (Fouad, Habba et al. 2024).

Yelamasetti vd. çalışmalarında, 6 mm kalınlığındaki 7075 ve 5083 AA çiftini ER4043 dolgu teli kullanarak TIG kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve kaynak parametrelerinden kaynak hızının ve kök boşluğunun mekanik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. 210 A-230 A kaynak akımı, 1 mm-2 mm kök boşluğu ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak

gerçekleştirilmiştir. En yüksek çekme dayanımı, kaynak akımı 210 A, kök boşluğu 1.5 mm iken 224 MPa, en yüksek sertlik değeri kaynak akımı 220 A, kök boşluğu 1.5 mm iken 112 BHN ve en yüksek darbe tokluğu kaynak akımı 220 A, kök boşluğu 1.5 mm iken 58J olarak elde edilmiştir. 210 A–220 A arası kaynak akımı ve 1.5 mm kök boşluğu optimum parametre olarak tespit edilmiştir. Kaynak akımının ve kök boşluğunun kaynak dikişinin mekanik özellikleri (çekme dayanımı, sertlik, darbe tokluğu) üzerinde olan kritik etkisi ortaya konulmuştur (Yelamasetti, Sandeep et al. 2024).

Yahaya vd. çalışmalarında, 6 mm ve 16 mm kalınlığındaki 7075-T6 AA çiftini ER5356 metal kullanarak TIG kaynağı yöntemiyle kaynatmış, kaynak kalitesini ve mekanik performansı iyileştirmek için kaynak parametrelerini optimize etmişlerdir. 120 A–180 A arasında farklı kaynak akımları, koruyucu gaz olarak ise CO₂ kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Yüksek akımlar, aşırı ısınma ve termal yumuşama nedeniyle sertliğin ve gerilme mukavemetinin azaldığı gözlenmiştir. 6 mm ve 16 mm kalınlıktaki malzemelerde sertlik kaybı en az 160 A’de meydana gelmiştir. Bu parametrede meydana gelen sertlik kaybı; kaynak merkezinde sırasıyla %18 ve %25, ısıdan etkilenmiş bölgede (HAZ) sırasıyla %9–%9,5 ve %9, kaynak bölgesinde sırasıyla %28 ve %22,2 civarında olduğu belirlenmiştir. Kaynak merkezinde sertliğin 6 mm kalınlık ve 180 A’de %37,16, 16 mm kalınlık ve 120 A’de %38,6 azaldığı görülmüştür. 160 A’de çekme dayanımı 6 mm kalınlıkta 325 MPa, 16 mm kalınlıkta 290 MPa olarak ölçülmüştür. 7075 AA plakalar için 160 A kaynak akımında, en yüksek çekme dayanımı ve en düşük sertlik kaybı yaşandığı tespit edilmiştir (Yahaya, Kumar et al. 2024).

TIG kaynağı üzerinde yapılan çalışmalarda, dolgu teli seçiminin kaynak dikiş kalitesine ve nüfuz derinliğine, kaynak parametrelerinin ise tane boyutuna ve darbe tokluğuna, her ikisinin de mekanik özelliklere etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Kaynak

sonrası yaşlandırma, PHR ve PWHT gibi uygulamaların mikro yapıyı iyileştirerek ve çökelti fazlarını düzenleyerek mekanik özellikleri artırabildiği ve BM değerlerine yaklaştırabildiği tespit edilmiştir.

Alüminyum Alaşımlarında TIG+ Sürtünme Karıştırma İşlemi (FSP) Kaynağı Uygulamaları

TIG kaynağı ile birlikte FSP yönteminin kullanılması, kaynak bölgesinin mikro yapı ve mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. FSP işlemi kaynak bölgesindeki taneleri incelterek mukavemeti arttırmaktadır ve kaynak sonrası oluşan gerilmeleri azaltmaktadır.

Literatürde TIG kaynağı ile birlikte FSP yönteminin kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur. Mehdi ve Mishra çalışmalarında, 6 mm kalınlığındaki 7075 ve 6061 AA çiftini ER5356 ve ER4043 dolgu telleri kullanarak TIG kaynağı ile kaynatmışlardır. Ardından kaynak bölgesine 700, 800, 900, 1000, 1100 rpm takım dönüş hızı, 70 mm/dk ilerleme hızı ve 1° eğim açısı parametrelerinde FSP uygulayarak, bu proseslerin mekanik özelliklere olan etkilerini incelemişlerdir. ER4043 ve ER5356 için sırasıyla 95 A, 110 A kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. TIG+FSP kaynak bağlantısında, ER5356 dolgu telinin ER4043 dolgu teline göre mekanik özelliklerini ve aşınma direncini daha fazla arttırdığını gözlemlemişlerdir. ER5356 dolgu telinde maksimum sertlik 137 HV ulaşırken, ER4043 dolgu telinde bu değer 118 HV olarak ölçülmüştür. Sertlik değerlerinin farkının, ER5356 dolgu telindeki Mg elementinin oluşturduğu yoğun MgZn₂ taneciklerinin ince tane yapısından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca MgZn₂ taneciklerinin, alaşımın mukavemetini ve aşınma direncini artıran başlıca çökelti olduğu tespit edilmiştir (Mehdi and Mishra 2021). Diğer bir çalışmalarında ise FSP prosesinde takım

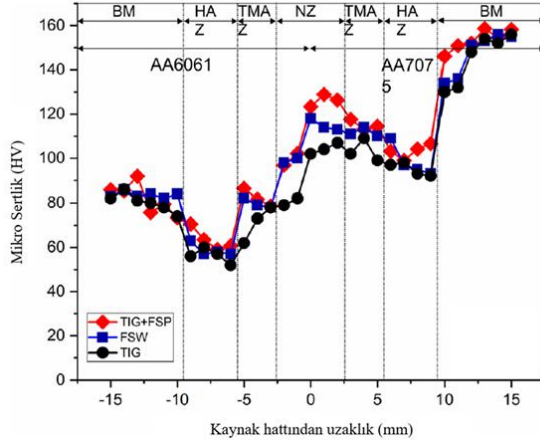
dönüş hızının artırılması ve ilerlemenin azaltılması ile bölgeye fazladan ısı girdisi sağlanmış ve böylece FSP öncesi kaynaklı numunelere göre çekme dayanımının 183 MPa'dan 255 MPa'ya ve sertlik değerlerinin 89.65 HV'den 105 HV'ye yükseldiği gözlemlenmiştir. TIG kaynağı sonrası FSP uygulanmasının, mekanik özelliklerde ve kalan gerilmelerde belirgin seviyede gelişmeler sağlayabileceği ve bu sayede kaynaklı birleşimlerin performansının artırılacağı vurgulanmıştır (Mehdi and Mishra).

Reyaz ve Sinha çalışmalarında, 6 mm kalınlığındaki 7075-T6 ve 6061-T6 AA çiftini ER5356 dolgu teli kullanarak TIG kaynağı yöntemiyle kaynatmışlardır. Ardından kaynak bölgesine 900-1400 rpm takım dönüş hızı, 35-65 mm/dk ilerleme hızı ve 1°-3° eğim açısı parametrelerinde FSP uygulayarak, bu proseslerin mekanik özelliklere olan etkilerini incelemişlerdir. 150 A kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Takım dönüş hızının çekme dayanımını %44.31, darbe tokluğunu %40.09 ve sertliğini %30.61 oranında arttırdığı belirlenmiştir. 900 rpm'de çekme dayanımı 214 MPa ve sertlik 95 HV iken 1400 rpm'de çekme dayanımı 277 MPa ve sertlik 124 HV'dir. Kalıntı gerilmelerinin %27.46 oranında azalarak yaklaşık 26.9 MPa seviyesine indiği gözlemlenmiştir. FSP'nin kaynak bölgesinde dendritik kaba taneciklerden ince taneli ve yüksek açılı tane içeren yapılar oluşturduğu ortaya konulmuştur (Reyaz and Sinha 2025). Diğer bir çalışmalarında ise 148 A kaynak akımı, 55 mm/dk ilerleme hızı ve 2° eğim açısı ve 1300 rpm takım dönüş hızında FSP sonrası mikro yapı incelemişlerdir. FSP sonrası kaynak bölgesinde tane boyutu 24.68 µm'den 4.17 µm'ye, aşınma 132 µm'den 68 µm'ye düşerken, çekme dayanımı 159 MPa'dan 278 MPa'a, darbe tokluğu 9 J'dan 17 J'a yükseldiği tespit edilmiştir. TIG kaynaklı bağlantıların kaba dimpler ve çatlaklar içeren kırılma yüzeyi ile daha gevrek kırılma eğilimi sergilediği, TIG + FSP bağlantılarında ise ince, eş eksenli

dimple yapılar ve boşluk içermeyen yüzeyler gözlemlenmiştir (Reyaz and Sinha 2024).

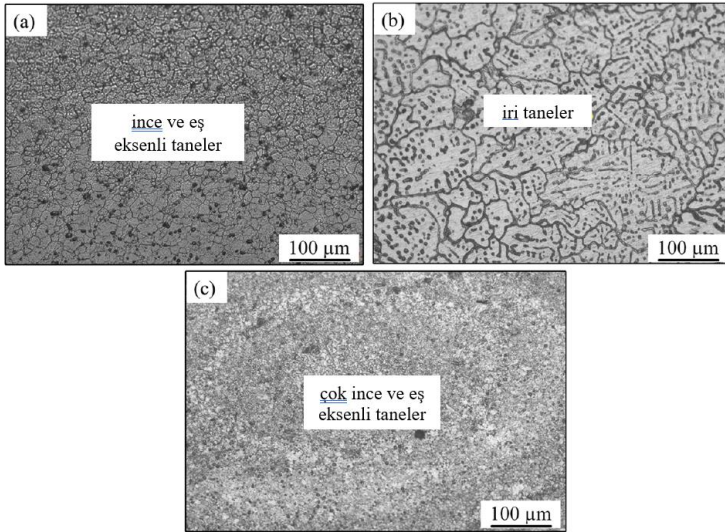
Rana vd. çalışmalarında, 6 mm kalınlığındaki 7075 ve 6061 AA çiftini ER4043 dolgu teli kullanarak TIG, FSW ve TIG+FSP yöntemiyle kaynatmışlar ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlar. 150 A kaynak akımı, FSP için 931 rpm takım dönüş hızı, 40 mm/dk ilerleme hızı ve 1° eğim açısı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. TIG, FSW ve TIG+FSP kaynaklarında tane boyutu sırasıyla 63 μm , 10.1 μm ve 7.2 μm 'dir. TIG yöntemiyle kaynaklanan bağlantının verimliliği %53, çekme dayanımı 158 MPa, uzama %13 ve sertlik 108 HV'dir. FSW yöntemiyle kaynaklanan bağlantının verimliliği %65, çekme dayanımı 195 MPa, uzama %19 ve sertlik 121 HV'dir. TIG+FSP yöntemiyle kaynaklanan bağlantının verimliliği %77, çekme dayanımı 233 MPa, uzama %21 ve sertlik 128 HV'dir. Kaynak sonrası FSP uygulaması sonucunda, mikro yapıda daha ince ve homojen taneler olduğu görülmüştür. Bu sayede kaynağın birleşim kalitesini ve mekanik özelliklerini arttırdığı tespit edilmiştir (Rana, Karunakar et al. 2025). Şekil 4'de çalışmada ölçülen sertlik dağılımı ve Şekil 5'de mikro yapıları verilmiştir.

Şekil 4 Farklı metal kaynaklı birleştirmelerin mikro sertliği, (a) TIG + FSP, (b) FSW ve (c) TIG



Kaynak: (Rana, Karunakar et al. 2025)

Şekil 5 Kaynaklı bağlantısının (a) FSW, (b) TIG ve (c) TIG + FSP yöntemleriyle elde edilmiş optik mikroskop görüntüleri



Kaynak: (Rana, Karunakar et al. 2025)

TIG kaynağı sonrası uygulanan FSP'nin, kaynak bölgesindeki kaba taneleri incelterek, daha homojen ve ince taneli bir mikro yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda

çekme dayanımı, sertlik, uzama ve darbe tokluğu gibi mekanik özelliklerin arttığı tespit edilmiştir.

Alüminyum Alaşımlarında MIG Kaynağı Uygulamaları

MIG kaynağı, hızlı ve verimli bir kaynak yöntemi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde tercih edilmektedir. Yüksek ısı girdisi ile yüksek mekanik mukavemete sahip ve dış etkenlere karşı uzun süre zarar görmeden dayanabilen kaynak dikişleri oluşturmaktadır.

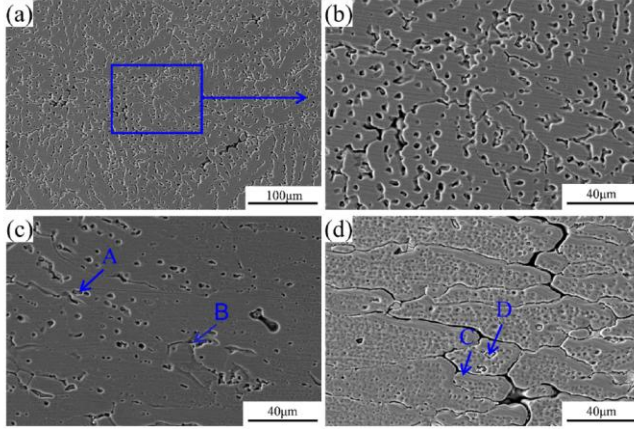
Literatürde MIG kaynağı yönteminin kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur. Wang vd. çalışmalarında, 3 mm kalınlığında ki 7075 ve 6061 AA çiftini TiC nanoparçacıkları içeren ve içermeyen 7075 AA dolgu teli kullanarak lazer-MIG hibrit kaynak yöntemiyle kaynatmışlar ve dolgu tellerinin mekanik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. 121 A kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. TiC nanoparçacıkları, kaynak dikişinde tanelerin incelmesini sağlayarak ortalama tane boyutunu yaklaşık 28.01 μm 'den 13.34 μm 'ye düşürmüştür. TiC nanoparçacıkları içeren ve içermeyen kaynak dikişinde sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı ve çekme uzaması sırasıyla; 62.8 HV ve 34.5 HV, 208.9 MPa ve 95.7 MPa, 155.1 MPa ve 57.1 MPa, %4.7 ve %15.4'dür. TiC nanoparçacıkları kaynak telinden kaynak dikişine başarıyla geçmiş, parçacık dağılımının daha homojen ve ince yapılı olmasını sağlamıştır. Bu sayede Mg difüzyonu engellenerek, sıcak çatlak oluşumunun önlendiği, kaynak kalitesi ve mekanik performansın arttığı gözlemlenmiştir (Wang, Tian et al. 2024).

Mercan vd. çalışmalarında, 5 mm kalınlığındaki 5754-H111 ve 6013-T6 AA çiftini ER5356 dolgu teli kullanarak GMAW (MIG) yöntemiyle kaynatmışlardır. Farklı tel besleme ve kaynak hızları kullanılarak mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 125 A-145 A kaynak akımı, 2.5 mm/s, 3 mm/s ve 3.5 mm/s kaynak hızı, 3 m/dk,

3.5 m/dk ve 4 m/dk tel besleme hızı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. 125 A, 3.5 mm/s kaynak hızı ve 3 m/dk tel besleme hızında en düşük çekme dayanımı ve uzama miktarı sırasıyla 120.87 MPa ve %2.67 iken 140 A, 2.5 mm/s kaynak hızı ve 3.5 m/dk tel besleme hızında en yüksek çekme dayanımı ve uzama miktarı sırasıyla 221.17 MPa ve %7.74 olarak gözlemlenmiştir. 5754 ve 6013 AA çiftlerinin BM, HAZ ve WM bölgelerindeki yaklaşık sertlik değerleri sırasıyla 75-80 HV ve 130 HV, 60-70 HV ve 90-100 HV, 70-80 HV'dir. Sabit kaynak akımı ile ısı girdisinin artmasından dolayı tanecik boyutlarının büyüdüğü ve sertliğin azaldığı tespit edilmiştir (Mercan, Ayan et al. 2020).

Li vd. çalışmalarında, 6 mm kalınlığındaki 7075-T6 ve 6061-T6 AA çiftini ER5356 dolgu teli kullanarak darbeli MIG kaynak yöntemiyle kaynatmışlar ve kaynak hızının mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. 234 A kaynak akımı, 450-600 mm/dk kaynak hızı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. WZ'deki tane boyutu, kaynak hızı 450 ve 600 mm/dk iken sırasıyla 80 μ m ve 30 μ m'dir. 7075-HAZ'daki tane boyutu, kaynak hızı 450 ve 600 mm/dk iken sırasıyla 75-80 μ m ve 25-30 μ m'dir. Kaynak hızı 450, 500, 550 ve 600 mm/dak iken çekme dayanımı sırasıyla 174.02 MPa, 185.99 MPa, 176.33 MPa ve 172.02 MPa olarak ölçülmüştür. Hızla azalan ısı girdisi ve hızlanan soğumadan dolayı kaynak hızı arttıkça, kaynak bölgesindeki mikro yapının incelendiği ortaya konulmuştur. Bu durumun tane büyümesini engellediği ve tane incelmeye yol açtığı tespit edilmiştir. Çekme dayanımının kaynak hızına bağlı olarak önce arttığı ardından azaldığı ortaya çıkmıştır (Li, Liu et al. 2025). Kaynak hızı 450 mm/dk iken Şekil 6'da bölgelere göre mikro yapı verilmiştir.

Şekil 6 SEM Microstructures of Heterogeneous Joints at a Welding Speed of 450 mm/min (a) WZ; (b) Magnified area of WZ; (c) 6061-HAZ; (d) 7075-HAZ.



Kaynak: (Li, Liu et al. 2025)

Yang vd. 12 mm kalınlığındaki 7075-T651 AA çiftini, ER5356 dolgu teli kullanarak 3 katman olarak MIG kaynağı yöntemiyle kaynatmışlardır. Ardından soğuk metal yöntemi (CMT) ile 2 katman onarım yapmışlar ve proseslerin kaynak birleşimlerinin mikro yapısı ve kırılma tokluğu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kaynak prosesinde 130 A-180 A kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlar ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı incelemelerinde, onarım kaynak bölgesindeki incelenen mikro yapının ince taneli olduğu ve tane sınırı çökeltilerinin (η fazı) HAZ 'a kıyasla daha geniş aralıklarda dağıldığı gözlemlenmiştir. J integrali yöntemi ile yapılan eğilme testleri sonucunda üç noktadan elde edilen kırılma tokluğu değerleri, MIG kaynaklı HAZ bölgesinde 32.88 kJ/m² iken, CMT ile tamir edilen HAZ bölgesinde 43.38 kJ/m² ve onarım kaynak metalinde 42.68 kJ/m² olarak ölçülmüştür. Bu prosesin onarım kaynağının kırılma tokluğunu yaklaşık %30 oranında artırdığı belirtilmiştir. CMT tamir kaynağının 7075-T651 alaşım kaynak birleşimlerinde

mikro yapı iyileştirmesi sağladığı, sertlik dağılımını stabilize ettiği ve özellikle kritik olan HAZ bölgesinde kırılma tokluğunu artırdığı gözlemlenmiştir (Yang, Fu et al. 2020).

MIG kaynağı hızlı, verimli ve yüksek mekanik mukavemet sağlayan bir kaynak yöntemi olduğundan 7075, 6061, 5754 ve 6013 serisi gibi çeşitli alüminyum alaşımlarında tercih edildiği görülmüştür. Uygun parametreler ve dolgu malzemesi kullanıldığında bu yöntemin kaynak dikişinde tane incelmesi sağlayarak sertlik, çekme dayanımı ve kırılma tokluğunu artırdığı, sıcak çatlak oluşumunu engellediği ve mikro yapıyı iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, sabit kaynak akımı ile artan ısı girdisinden dolayı tane boyutlarının büyüdüğü ve sertliğin azaldığı tespit edilmiştir.

Alüminyum Alaşımlarında Lazer Kaynağı Uygulamaları

Lazer kaynağı alüminyum alaşımların birleştirilmesinde, yüksek enerji yoğunluğu sayesinde hızlı ve hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde verimli ve dayanıklı bağlantılar oluşturulabilmektedir.

Literatürde Lazer kaynağı yönteminin kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur. Ma vd. çalışmalarında, 0.8 mm kalınlığında ki 7075 AA çiftini aynı AA alaşımlı 0.8 mm, 1.3 mm, 1.9 mm kalınlıklarındaki dolgu şeridi kullanarak darbeli lazer kaynağı ile kaynatmışlardır. Kaynak parametrelerinin kaynak çatlakları üzerindeki etkilerini incelemişler ve çatlak oluşum mekanizmasını analiz etmişlerdir. Dolgu şeridinin yüksekliği artırıldıkça, kaynakta oluşan çok sayıdaki çatlakların Y-şekilden, I-şekline dönüştüğü gözlemlenmiştir. Ancak dolgu şeridi yüksekliği artışına bağlı olarak soğuma hızının azaldığı, buna bağlı olarak da kaynak metalinin örtülü gerilme ve çatlak oluşum riskinin de azaldığı gözlemlenmiştir. Darbeli lazer kaynak uygulamalarında dolgu şeridi yüksekliği kontrol edilerek, kaynak çatlaklarının oluşumunun azaltıldığı

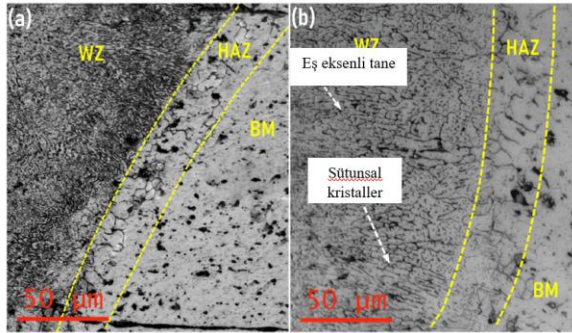
vurgulanmıştır (Ma, Yue et al. 2022). Diğer bir çalışmada ise, Al-Zn-Mg-Cu alaşımlı dolgu teli kullanarak lazer-TIG kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve oluşan kaynak dikişinin element dağılımını, erimiş havuz akış davranışını ve mekanik özelliklerini incelemiştir. 7075 AA'da, lazer-TIG kaynağı ve Zn içerikli dolgu teli kullanımı ile kaynak bölgesinde dengeli element dağılımı nedeniyle mikro yapı değişikliklerinin minimize edildiği ve buna bağlı olarak diğer kaynak metotlarına göre mekanik özelliklerin korunduğu belirtilmiştir (Ma, Luo et al. 2024).

Bao vd. çalışmalarında, 1mm kalınlığındaki 7075 süper sert AA ve D6AC ultra yüksek dayanımlı yapı çeliğini doğrudan lazer kaynak ile kaynatmışlar, mikro yapısal ve mekanik özelliklerini incelemiştir. 396 W lazer gücü, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlar ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak dikişinin kesitinde üç ana bölge (I, II, III) belirlenmiş ve her bölgede farklı intermetalik bileşikler olduğu gözlemlenmiştir. Alüminyum tarafında "ada" şeklinde Fe_3Al ve Fe_2Al_5 , iğne ve floküler yapıda $FeAl_3$ intermetalik bileşikler gözlemlenmiştir. Çelik tarafında ise yaklaşık 11 μm kalınlıkta Fe_2Al_5 tabakası oluşmuştur. Alüminyum tarafında ısı etkilenmiş bölgede yoğun ve ince dallanmış yapılar (dendritler) görülürken, çelik tarafında kaba östenit taneleri oluşmuştur. Alüminyum tarafındaki intermetalik yapıların katı ve gevrek yapıları nedeniyle kaynak bağlantısında mikro çatlaklar ve gözenekler olduğu buna bağlı olarak çekme testi sırasında kırılmanın alüminyum tarafındaki füzyon hattında meydana geldiği gözlemlenmiştir (Bao, Zhou et al. 2021).

Karami vd. çalışmalarında, 1 mm kalınlığındaki biriktirici levha bağlama (ARB) yöntemiyle üretilen 6061 çok katmanlı AA çiftini ER5053 dolgu teli kullanarak lazer kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar, lazer kaynak parametrelerinin mekanik özellikler ve mikro yapı üzerindeki etkilerini incelemiştir. ARB sonrası çekme

dayanımının yaklaşık iki kat arttığı, ancak uzama miktarında azalma olduğu görülmüştür. 40 ve 50 mm/sn kaynak hızları, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Dolgu teli kullanımı ve 40 mm/s kaynak hızı ile kaynak bölgesindeki kusurların (porozite, sıcak çatlak) azaldığı, mekanik performansın geliştiği gözlemlenmiş olup ve 286 MPa'lık maksimum çekme dayanımı elde edilmiştir. Kaynak sonrası malzemenin çekme dayanımının %20 azaldığı ve sünekliğin %43 oranında arttığı tespit edilmiştir. ARB kaynağının 50 mm/s kaynak hızında daha düşük performans gösterdiği saptanmıştır (Karami, Yousefieh et al. 2025). 40 ve 50 mm/sn kaynak hızlarındaki mikro yapı Şekil 7’de verilmiştir.

Şekil 7 (a) ve (b) sırasıyla 40 ve 50 mm/s hızlarında kaynaklanmış çok katmanlı 6061'in farklı konumlarının mikro yapısının Optik Mikroskop görüntüleri.



Kaynak: (Karami, Yousefieh et al. 2025)

Song vd. çalışmalarında, 1 mm kalınlığındaki 7075 T6 AA çiftini ER5356 dolgu teli kullanarak lazer-TIG hibrit kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve kısmi haddeleme (partial rolling) yaparak mekanik özellikler ve mikro yapı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 80 A kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi sonrası çekme dayanımının,

BM'nin %69'u seviyesinde (365 MPa) olduğu, yapılan haddeme işlemi sonrasında bu dayanım artarak BM'nin %87'si düzeyine (454 MPa) yükseldiği tespit edilmiştir. Kaynak işlemi sonrasında %3.3 olan uzama oranının, haddeme sonrasında %6.6'ya yükseldiği gözlemlenmiştir. Haddeme işlemi sonrasında, sertlik değeri FZ 'de %43.5, HAZ 'da %17.8 oranında artış göstermiştir. Mikro yapıda belirgin tane değişikliği olmamasına rağmen, plastik deformasyon etkisiyle dislokasyon yoğunluğunun arttığı ortaya konulmuştur (Song, Wang et al. 2022).

Lv ve Liu çalışmalarında, 1.5 mm kalınlığındaki 6061 AA ve 2 mm kalınlığındaki AZ31 Mg alaşım çiftini, Zn dolgu teli ile lazer-ofset-TIG kaynak yöntemiyle kaynatmışlardır. Lazer ile ark arasındaki yanıl ofset mesafesinin (DLAP) mikro yapısını ve kaynak bağlantısının mekanik performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kaynak işlemi 80 A kaynak akımı, 350 W ve 400 W lazer gücü, 800 mm/dk kaynak hızı parametrelerinde, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlar ve kaynak işlemini tek taraflı olarak gerçekleştirmişlerdir. Lazer ile ark arasındaki yanıl ofset değeri 0-4 mm arasında farklı değerlerde ayarlamak, dolgu malzemesinin kaynak yüzeyine yayılmasını etkilemiş ve kaynak sırasında oluşan kırılğan intermetalik bileşik (IMC) miktarının kontrol edilmesini sağlamıştır. Offset mesafesi 0 mm'den 2 mm'ye arttırıldığında, dolgu metalinin yayılma genişliği 2.13 mm'den 3.49 mm'ye yükselmiş, nüfuz derinliği 0.91 mm'den 0.66 mm'ye azalmıştır. Kaynak bölgesinde Al katı çözelti, $MgZn_2$ IMC'ler, Zn katı çözelti ve $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ üçlü IMC oluşumu gözlemlenmiştir. Özellikle 2 mm offsette, füzyon bölgesindeki iri $MgZn_2$ taneleri ince $(Al)+(Zn)+MgZn_2$ ötektoid yapısına dönüşmüş ve kaynak köşesindeki kırılğan $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ üçlü IMC oluşumunu engellenmiştir. Bu dönüşümün ofsetsiz mikro yapıya göre mekanik özelliklerin yaklaşık %30 oranında artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir (Lv and Liu 2022).

Gao vd. çalışmalarında, 4 mm kalınlığındaki toz metalurjisi yöntemi ile hazırlanmış SiCp/6061-T6 Al MMCs alaşımını lazer-TIG hibrit kaynak ile kaynatmışlar ve kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerini ve mikro yapısını incelemişlerdir. Kaynak işlemi 140 A-220 A kaynak akımı, 353 W-554 W lazer gücü, 600-1000 mm/dk kaynak hızı parametrelerinde tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Ark akımı 160 A, kaynak hızı 800 mm/dk, lazer gücü 454 W parametrelerinde en yüksek çekme dayanımı 182.67 MPa olarak ölçülmüştür. Kaynak bağlantısının çekme dayanımının ark akımı, kaynak hızı ve lazer gücünün artışıyla arttığı, maksimum değere ulaştıktan sonra azaldığı gözlemlenmiştir. Lazer gücünün artmasıyla, SiC parçacıklarının çözünmesinin ve Al_4C_3 iğne şeklinde kırılğan fazların oluşumunun arttığı ve buna bağlı olarak kaynak bağlantısının dayanımının azaldığı belirtilmiştir (Gao, Zhang et al. 2025).

Lazer kaynak ile yapılan çalışmalarda kaynak akımı, lazer gücü, kaynak hızı, ofset mesafesi ve dolgu teli gibi parametrelerin mekanik özellikler ve mikro yapı üzerinde etkileri olduğu gözlemlenmiştir. IMC oluşumu, çatlaklar ve gözenekler gibi kusurların kontrolü ile çekme dayanımı ve süneklik gibi mekanik özelliklerde iyileşmeler elde edilmiştir.

Alüminyum Alaşımlarında Yüzey Gerilimli Ark Kaynağı Uygulamaları

Yüzey gerilimli ark kaynağı, kontrol edilebilir ve stabil bir ark yapısı sağlayarak kaliteli kaynak dikişleri oluşturmaktadır. Bu yöntem, yüksek ısı girdisi ile malzemenin hızlı ergimesi ile dayanıklı ve homojen kaynak bağlantıları elde edilmesini sağlamaktadır. Özellikle kalın kesitli alüminyum parçaların kaynağında tercih edilmektedir.

Literatürde Yüzey Gerilimli Ark Kaynağı, yönteminin kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur. Yapılan çalışmaların yaygın

kullanılmadığı gözlemlenmiştir. Elde edilen çalışmalar sınırlı olarak verilmiştir. Nagasai vd. çalışmalarında, 3 mm kalınlığındaki 6061 AA çiftini AA4043 dolgu teli kullanarak yüzey gerilim transferli (STT) ark kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Çalışmada 87 A kaynak akımı kullanılmış ve kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Alüminyum alaşımı, WM bölgesinde incelmış ve epitaksiyel grain büyümesi sonucunda tane sınırları kaynak havuzunun merkezine doğru uzayarak sütunsal tane yapısı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Kaynak metalinin ortalama tane boyutu 23.87 μm iken, HAZ ve ana metal (BM) için bu değerler sırasıyla 53.86 μm ve 46.76 μm olarak tespit edilmiştir. Sertleştirici precipitatların b" (Mg_5Si_6)'dan b (Mg_5Si_6) dönüşümü ile magnezyum kaybı ve tane büyümesi gözlemlenmiştir. Bundan dolayı çekme dayanımı, BM'de 318 MPa ve kaynaklı bağlantıda 226 MPa olarak ölçülmüştür. (Nagasai, Ramaswamy et al. 2023).

Alüminyum Alaşımlarında Dönen Lazer-Brazing Kaynağı Uygulamaları

Lazer-brazing yöntemi ile lazer ışınının sağladığı yüksek hassasiyet ve kontrollü ısı girişi sayesinde ince ve temiz bağlantılar oluşturmaktadır. Bu teknik, alüminyumun ısıya duyarlı yapısını koruyarak deformasyonları minimize ederek hızlı üretim imkânı sunmaktadır. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde hafif ve dayanıklı birleşimler için tercih edilmektedir.

Literatürde Dönen Lazer-Brazing Kaynağı, yönteminin kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur. Yapılan çalışmaların yaygın kullanılmadığı gözlemlenmiştir. Elde edilen çalışmalar sınırlı olarak verilmiştir. Xie vd. çalışmalarında, 1.2 mm kalınlığındaki 6061 AA ve 0.9 mm kalınlığındaki 304 paslanmaz çeliği AlSi12 alaşımlı flux çekirdekli dolgu teli ile dönen lazer kaynakla-brazing teknolojisi kullanılarak birleştirmişlerdir. IMC oluşumunu engelleyerek kaynak

bağlantısının mekanik performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kaynak işlemi 2800 W lazer gücü, 10 mm/s kaynak hızı parametrelerinde, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlar ve kaynak işlemini tek taraflı olarak gerçekleştirmişlerdir. Kaynak sırasında homojen sıcaklık dağılımından dolayı Fe atomlarının difüzyonunu kısıtlamadığından, IMC tabakasında kalınlığın azaldığı gözlemlenmiştir. Döner lazer kaynak-brazing yöntemiyle yapılan kaynaklarda çatlaklar kaynak metalinden geçmektedir ve IMC tabakası çatlak oluşumunu engellemektedir. Bu durumun kaynak dayanımını arttırdığı ortaya konulmuştur (Xie, Cai et al. 2023).

Alüminyum Alaşımlarında CMT Kaynağı Uygulamaları

CMT kaynağı, düşük ısı girdisi sayesinde malzemede minimum deformasyon ve gerilme oluşmasını sağlamaktadır. Bunun sayesinde özellikle ince kesitli alüminyum parçaların birleştirilmesinde yüksek kaliteli ve dayanıklı bağlantılar elde edilmektedir.

Literatürde CMT Kaynağı, yönteminin kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur. Yapılan çalışmaların yaygın kullanılmadığı gözlemlenmiştir. Elde edilen çalışmalar sınırlı olarak verilmiştir. Bellamkonda vd. çalışmalarında, 3 mm kalınlığındaki 6061 AA ve AZ31B magnezyum alaşım çiftini ER4043 dolgu teli kullanarak CMT ark kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve CMT parametrelerinin mekanik özelliklere etkilerini inceleyerek yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) ile optimize etmişlerdir. 4400–5000 mm/dk tel besleme hızı (WFS), 250–280 mm/dk kaynak hızı (WS), %5-%15 ark uzunluğu düzeltme (ALC), koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada WFS 4700 mm/dk, WS 280 mm/dk, ALC %10 olduğu zaman çekme dayanımı (TS) 33 MPa, kaynak metali sertliği (WMH) 95.8 HV olarak ölçülmüşken, RSM ile WFS 4696.32 mm/dk, WS 283.10 mm/dk, ALC %8.3134 iken TS 33.4656

MPa ve WMH 96.7912 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak bölgesindeki Al/Mg intermetalik bileşiklerin varlığının, kaynak bağlantısının mukavemetini sınırlamakta olduğu, kırılmanın da genellikle gevrek ve intermetalik bileşiklerin yoğun olduğu noktalarda gerçekleştiği belirlenmiştir (Bellamkonda, Addanki et al. 2024).

Alüminyum Alaşımlarında TIG+FSW Kaynağı Uygulamaları

Hassas ve ince detay gerektiren parçalarda TIG kaynağı kullanılarak yüksek kaliteli kaynaklar elde edilirken, FSW ile özellikle kalın ve dayanıklılık gerektiren birleşimlerde üstün mekanik özellikler elde edilmektedir. Bu iki yöntemin kullanımı, alüminyumun farklı alaşım ve kalınlıklardaki kaynak işlemlerinde çeşitlilik ve verimlilik sağlamaktadır.

Literatürde TIG kaynağı ile birlikte FSW yönteminin kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur. Zhang vd. çalışmalarında, 1.6 mm kalınlığındaki 2024-T3 ve 2 mm kalınlığındaki 7075-T6 AA çiftini sürtünme karıştırılmalı nokta kaynağı (FSSW) kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve hem ortam havasında hem de su altında kaynak bölgesi ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma da takım dönüş hızı 630-1400 rpm, takım batma derinliği 0.1-0.5 mm uygulanmış ve tek taraflı kaynak yapılmıştır. Ortam havasında ve su altında yapılan kaynakta sıcaklık, karışım bölgesinin (SZ) genişliği ve dairesel iz genişliği sırasıyla 425°C ve 300°C, 4.85-7.1 mm ve 1.5-4.2 mm, 7.89-10.49 mm ve 7.5-9.57 mm'dir. Takım dönme hızı 600 rpm, takım batma derinliği 0.1 mm ve 0.5 mm iken ortam havasında ve su altında tane boyutu sırasıyla 3.3 µm ve 2.6 µm, 5.0 µm ve 3.3 µm'dir. Takım dönme hızı 600-1400 rpm, takım batma derinliği 0.1 mm iken ortam havasında ve su altında tane boyutu sırasıyla 3.3 µm'dan 7.8 µm'ye ve 2.6 µm'dan 5.2 µm'ye yükselmiştir. Takım dönme hızı 600 rpm ve 1400 rpm, takım batma derinliği 0.1 mm iken ortam havasında ve su altında çekme kuvveti sırasıyla 4000

N ve 4600 N, 5700 N ve 6400 N'dur. Su altı kaynaklarda daha ince tane yapısı görülmüştür. Takım batma derinliği ve takım dönme hızı arttıkça, tane boyutların arttığı tespit edilmiştir. Tane incelmesi ve Al_2CuMg gibi dayanımı artıran presipitelerin varlığı nedeniyle kaynakların çekme-kayma yüklerinin arttığı saptanmıştır (Zhang, Xiao et al. 2021).

Dwivedi vd. bu çalışmalarında, 4 mm kalınlığındaki 7075 AA çiftini iki farklı kaynak olan ototjen TIG (ATIG) ve FSW kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve mekanik özelliklerini incelenmiştir. Çalışmada FSW kaynak hızı 20 mm/dk ve tek taraflı kaynak, ATIG kaynağı 140 A-200 A kaynak akımı ve çift taraflı kaynak yapılmıştır. FSW kaynağının çekme dayanımı 255.33 MPa iken ATIG kaynağının 206.11 Mpa'dır. FSW kaynağının ortalama sertlik değeri 135.8-136.83 HV iken ATIG kaynağının 130.9 HV olarak ölçülmüştür. FSW yöntemi, kaynak bölgesinde ince ve eş eksenli taneler oluşturarak homojen ve dayanıklı bir mikro yapı sağlamıştır. Buna karşın ATIG yönteminin, yüksek ısı girdisi ve hızlı soğuma nedeniyle kaba taneler oluşturduğu görülmüştür. FSW'de takımın dönme hızı arttıkça tane boyutunun arttığı, bunda çekme dayanımının düşmesine ve kaynak bölgesinin kırılgenliğinin artmasına yol açtığı belirtilmiştir. Sertlik ise dönme hızıyla birlikte artış göstermiştir (Dwivedi, Tiwari et al. 2020).

Dewangan vd. çalışmalarında, 4 mm kalınlığındaki 6061 AA çiftini TIG ve FSW kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve mekanik özelliklerini incelenmiştir. Çalışmada FSW kaynak hızı 25 mm/dk ve takım dönüş hızı 900 rpm, TIG kaynağı 153 A kaynak akımı kullanılmıştır ve tek taraflı kaynak yapılmıştır. FSW kaynağının çekme dayanımı 64 MPa iken TIG kaynağının 64.3 MPa'dır. Kaynak bölgesi yani 0 mm'den ± 20 mm'ye kadar FSW ve TIG kaynağının ortalama sertlik değeri sırasıyla 34 RHN ve 24 RHN iken yaklaşık 70 RHN ve 73 RHN olarak ölçülmüştür. TIG kaynağında erime ve yeniden katılaşma olduğu için mikro yapıda globüler ikinci fazlar

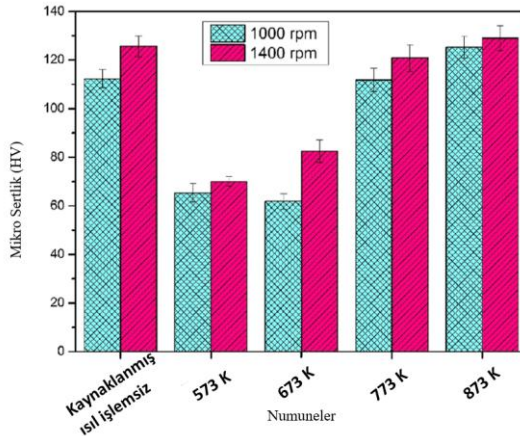
oluşturmuştur. FSW ise katı hal kaynağı olduğundan malzemenin fiziksel durumu değişmemiş, mikro yapının korunduğu vurgulanmıştır (Dewangan, Reddy et al. 2024).

Ren vd. çalışmalarında, 4 mm kalınlığındaki 7075-T6 ve 6061-T6 AA çiftini FSW kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve ısıtıl işlem uygulayarak mekanik özelliklerini incelenmiştir. Çalışmada FSW kaynak hızı 50 mm/dk, takım dönüş hızı 1200 rpm kullanılmış ve tek taraflı kaynak yapılmıştır. 6061 BM FSW öncesi, FSW sonrası SZ'deki ve PWHT sonrası tane boyutu sırasıyla 17.71 μm -44.38 μm , ~4.57 μm ve 27.56 μm – >500 μm 'dir. Tane boyutu 500 μm 'yi aşmakta ve güçlü bir kristal doku (texture) oluşturmaktadır. Çekme dayanımı PWHT öncesi ve sonrası çekme dayanımı, sertlik ve uzama sırasıyla 207 MPa'dan 290 MPa'a, 106 HV'den 151 HV'ye ve %2.49'dan %3.07'ye yükseldiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi Mg_2Si fazlarının daha homojen şekilde çökmesi olarak tespit edilmiştir. Yüksek Mg/Si oranlı eklemlerde ise Si içeriğinin azlığı nedeniyle kayda değer bir iyileşme olmadığı gözlemlenmiştir (Ren, Liu et al. 2025). Başka bir çalışmalarında ise, çökeltme tavı (ST), yapay yaşlandırma (AA) ve çökeltme + yapay yaşlandırma (STA) uygulayarak kaynağın mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Isıl işlem uygulanmamış, ST, AA ve STA uygulandığında çekme dayanımı sırasıyla 207 MPa, 232 MPa, 219 MPa ve 290 MPa, çekme uzaması sırasıyla %2.49, %5.42, %1.55 ve %3.07, kaynak verimliliği sırasıyla %66.99, %75.08, %70.87 ve %94.46, ortalama sertlik sırasıyla 98.78 HV, 81.48 HV, 102.52 HV ve 113.95 HV olarak ölçülmüştür. STA işlemi, malzeme içindeki alaşım elemanlarının homojen dağılımını ve sertleştirici precipitatlerin (Mg_2Si fazı gibi) ince ve uniform oluşumunu sağlamış, böylece tane büyümesini kontrol edip mekanik dayanımı arttırdığı saptanmıştır (Ren, Liu et al. 2025).

Sharma vd. çalışmalarında, 5 mm kalınlığındaki 5083-O ve 2014-T651 AA çiftini FSW kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve ısıtıl

işlem uygulayarak mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada FSW kaynak hızı 63 mm/dk, takım dönüş hızı 1000 ve 1400 rpm kullanılmış ve tek taraflı kaynak yapılmıştır. PWHT için 573 K, 673 K, 773 K ve 823 K 60 dk uygulanmıştır. 1000 rpm ve 1400 rpm takım dönüş hızlarındaki 573 K, 673 K, 773 K ve 823 K değerlerinde çekme dayanımı; 210 MPa ve 195 MPa, 198 MPa ve 205 MPa, 190 MPa ve 180 MPa, 135 MPa ve 162 MPa, uzama değerleri yaklaşık olarak sırasıyla; %15 ve %17.5, %22.5 ve %18.5, %18.5 ve %18.5, %7.5 ve %21.5, sertlik değerleri yaklaşık olarak sırasıyla; 65 HV ve 70 HV, 62 HV ve 82 HV, 111 HV ve 121 HV, 125 HV ve 130 HV'dir. Sertlik artışının precipitatların yeniden oluşması nedeniyle gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Ancak yüksek sıcaklıklardaki tane irileşmesinin mekanik dayanımı düşürdüğü belirtilmiştir (Sharma, Sharma et al. 2025). Isıl işlem sıcaklık değerlerine göre sertlik değerleri Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 8 Kaynaklanmış ısıl işlemsiz ve farklı sıcaklıklarda kaynak sonrası ısıl işlem (PWHT) görmüş numunelerin mikrosertliği.



Kaynak: (Sharma, Sharma et al. 2025)

Rahiman vd. çalışmalarında, 6 mm kalınlığındaki 7075 ve 6061 AA çiftini FSW kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve kaynak parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini

incelemişlerdir. Çalışmada FSW kaynak hızı 15, 25 ve 35 mm/dk, takım dönüş hızı 350, 450 ve 550 rpm, tapered hexagon, tapered square, ve tapered cylinder pin profilleri kullanılmış ve tek taraflı kaynak yapılmıştır. 350 rpm ve 15 mm/dk'deki maksimum akma gerilmesi (YS), çekme dayanımı (UTS) ve uzaması (E) sırasıyla yaklaşık 129 MPa, 135 MPa ve %8.9, 450 rpm ve 25 mm/dk'deki maksimum akma gerilmesi, çekme dayanımı ve uzaması sırasıyla yaklaşık 136 MPa, 146 MPa ve %9.5, 550 rpm ve 35 mm/dk'deki maksimum akma gerilmesi, çekme dayanımı ve uzaması sırasıyla yaklaşık 145 MPa, 152 MPa ve %11.2'dir. Tapered hexagon, tapered square, ve tapered cylinder pin profillerinde UTS ve YS değerleri 550 rpm ve 35 mm/dk'de sırasıyla yaklaşık 149 MPa ve 140 MPa, 140 MPa ve 135 MPa, 135 MPa ve 129 MPa'dır. Kaynak bölgesindeki tane inceliği ve partiküllerin daha homojen dağılımıyla mekanik özelliklerin iyileştiği belirlenmiştir. Kaynakta ortaya çıkabilen çatlak, gözenek gibi kusurlar minimum seviyede oluşmuş ancak alaşımların plastik özellikleri nedeniyle belirli yumuşama mekanizmaları gözlemlenmiştir (Rahiman, Santhoshkumar et al. 2021).

Kumar vd. çalışmalarında, 6 mm kalınlığındaki 5082 ve 7075 AA çiftini ER4043 dolgu teli kullanarak TIG kaynağı ve FSW kaynağı yöntemiyle kaynatmışlar ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada FSW kaynak hızı 25, 40, 63 mm/dk ve takım dönüş hızı 900 rpm, 1120 rpm, 1400 rpm ve tek taraflı kaynak yapılmıştır. FSW ve TIG kaynağının çekme dayanımı, akma dayanımı sırasıyla 164.3-205.3 MPa ve 81.9 MPa, 142.9-149.5 MPa ve 54.3 MPa'dır. FSW ve TIG kaynağının 5082, 7075 ve merkez kaynak bölgesindeki yaklaşık sertlik değerleri sırasıyla 90-95 HV ve 70-75 HV, 120-125 HV ve 80-85 HV, 105 HV ve 65 HV'dir. FSW kaynağında yeniden kristalleşme sonucu ince taneli ve homojen bir yapı oluşurken, TIG kaynağında yüksek ısının etkisiyle tane

büyümesi ve tane yapısının heterojenleşmesi gözlenmiştir (Kumar, Kumar et al. 2022).

Patil vd. bu çalışmalarında, 6.35 mm kalınlığındaki 7075-6061 AA ve 7075-7075AA çiftini Al-Si alaşımlı dolgu teli kullanarak TIG kaynağı ve FSW yöntemiyle kaynatmışlar ve proseslerin kaynak birleşimlerinin sertliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. TIG kaynağında; 280 A kaynak akımı, koruyucu gaz olarak saf Ar gazı kullanmışlardır ve çalışmada kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. FSW prosesinde ise 650-1000 rpm takım dönüş hızı, 30-40 mm/dk ilerleme hızı ve 0° takım eğimi parametreleri kullanılmıştır. TIG kaynağı ile birleştirilmiş numunelerde yüksek sıcaklık nedeniyle HAZ genişlemiş, kaynak bölgesinde boşluklar (voids) oluşmuş ve bunun sonucunda sertlik değerinin azaldığı belirtilmiştir. TIG kaynağında 7075-7075 AA için minimum sertlik yaklaşık 50.1 BHN ölçülürken 7075-6061 AA için 70.7 BHN olarak ölçülmüştür. FSW prosesinde ise oluşan ısı ile kaynak bölgesi mikro yapısındaki çökelti çözünmüş ve kaynak alanının yumuşamasına neden olduğu gözlemlenmiştir. FSW prosesinde ise 7075-7075 AA için minimum sertlik yaklaşık 70.1 BHN ve maksimum sertlik yaklaşık 121 BHN olarak ölçülürken, 7075-6061 AA bağlantısında ise dönme hızı ve ilerleme hızı arttıkça sertlik değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca FSW'nin hem benzer AA çiftlerinde hem de farklı AA'da mekanik özellikler açısından TIG'e göre avantaj sağladığı tespit edilmiştir (Patil, Patil et al. 2016).

TIG kaynağının, yüksek ısı girdisi nedeniyle tane büyümesine, HAZ genişlemesine, heterojen mikro yapılar ve voids oluşumuna yol açtığı; FSW'nin ise yeniden kristalleşme sayesinde ince taneli, homojen ve eş eksenli mikro yapılar oluşturduğu, daha yüksek sertlik ve çekme dayanımı sağladığı gözlemlenmiştir. FSW parametrelerinin ve kaynak ortamının tane boyutunu ve mekanik özellikleri etkilediği tespit edilmiştir. FSW sonrası uygulanan ısıl işlemlerin, alaşım elementlerinin homojen dağılımı ve ince

çökeltilerin oluşumuyla mekanik dayanımı daha da artırdığı ortaya konulmuştur.

Alüminyum Alaşımlarında Elektron Işın Kaynağı (EBW) Kaynağı Uygulamaları

EBW, yüksek enerji yoğunluğu sayesinde derin ve dar kaynak dikişleri oluşturabilen bir kaynak yöntemidir. Bu yöntem, vakum ortamında gerçekleştirildiği için kaynak bölgesinde oksitlenme ve kirlenme riski düşük olmaktadır, böylece yüksek kaliteli ve dayanıklı bağlantılar elde edilebilmektedir.

Literatürde EBW Kaynağı, yönteminin kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur. Yapılan çalışmaların yaygın kullanılmadığı gözlemlenmiştir. Elde edilen çalışmalar sınırlı olarak verilmiştir. Hayat çalışmasında, 6 mm kalınlığındaki 7075 AA çiftini EBW yöntemiyle kaynatmış, mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. 20 mA ve 25 mA kaynak akımı, 350 mm/dk kaynak hızı kullanmış ve kaynak işlemi tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. 20 mA ve 25 mA kaynak akımlarındaki FZ sertlik değerleri sırasıyla 159 HV ve 175 HV'dir. 20 mA'de Cu elementinin kırılmaya etkisi yokken, 25 mA'de kırılmada en etkili element olduğu tespit edilmiştir ve Cu bileşeni içeren ikinci fazlar oluştuğu gözlemlenmiştir (Hayat 2022).

Sonuçlar

Alüminyum alaşımlarının çeşitli kaynak metotlarıyla birleştirilmesinde, proses parametreleri farklı mikroyapı ve mekanik özelliklere neden olmaktadır. Bu çalışmada; kaynak bölgesinde ve

alaşımın kendisindeki mikroyapılara ve mekanik özelliklere kaynaklı birleştirilme parametrelerinin etkileri araştırılmış ve bu alanda yapılan çalışmalar derlenmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Alüminyum alaşımlarının TIG kaynağında, ısı girdisi miktarı ve dolgu teli bileşiminin değiştirdiği kaynak bölgesinin mikroyapısı ve oluşan mikro çatlaklar, kaynak mukavemetine doğrudan etki etmektedir. Diğer taraftan kök boşluğunun kaynak dayanıklılığı ve tokluğu üzerinde en etkili parametre olduğu, kaynak akımının da ikinci derecede önemli olduğu saptanmıştır.
2. TIG kaynağında düşük kaynak akımlarda veya kaynak hızının artmasıyla, kaynak bölgesine yetersiz ısı girdisi nedeniyle mikro yapıda oluşan düzensizlikler, kaynak mukavemetinin azalmasına sebep olabilmektedir. Diğer taraftan yüksek akımlarda veya düşük kaynak hızlarında ise aşırı ısınma nedeniyle kaynak bölgesinde ve HAZ'da yumuşama, tane büyümesi ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerde azalma gözlemlenebilmektedir.
3. TIG kaynak yöntemi yüksek ısı girdisi nedeniyle mikroyapıdaki fazlarda çözünme ve taneciklerde kabalaşma meydana gelmektedir. Ayrıca artan HAZ genişliği ve kaynak bölgesinde mikroyapıda oluşan boşluklar, belirgin bir yumuşamaya yol açmakta ve mekanik dayanımı önemli ölçüde azaltmaktadır. Özellikle yumuşamanın lokal kırılmaya gözeneklerden daha fazla etkisi olabilmektedir.
4. TIG kaynağında kullanılan dolgu telleri bileşimleri ve alaşım element etkileriyle kaynak bölgesindeki

tane büyüklüğünü, intermetalik faz dağılımını ve dolayısıyla mekanik performansı doğrudan etkilemektedir. Mg içeriğiyle ER5356 sağladığı daha ince tane yapısı ve daha yüksek sertlik değerleri nedeniyle mekanik özellikleri ve kaynak verimliliği arttırmaktadır. Si içeriğiyle ER4043 dolgu teli en yüksek uzama değerini sağlarken, ER4047 en düşük genel mekanik dayanımı göstermiştir. ER4047 ile kaynaklarda daha sünek kırılma davranışı görülürken, ER5356 ile yapılan kaynaklarda kırılmalık artmaktadır.

5. TIG kaynağında kaynak bölgesinde erime ve yeniden katılaşma olduğu için mikro yapıda ikincil fazlar oluşmaktadır. HAZ'da alüminyum alaşımına ve dolgu telinin cinsine bağlı olarak sertleştirici fazlar θ (Al_2Cu), S (Al_2CuMg) ve η ($MgZn_2$) oluşmaktadır. Kaynak bölgesindeki Al/Mg intermetalik bileşiklerin aşırı varlığı kaynak bağlantısının sertliğini arttırmakta ve mukavemetini sınırlamaktadır. Buna bağlı olarak kırılma, genellikle gevrek ve intermetalik bileşiklerin yoğun olduğu noktalarda gerçekleşmektedir.
6. TIG + FSP işlemi, TIG kaynağına kıyasla hem sertlik hem de çekme dayanımında belirgin artış sağlamaktadır. FSP esnasında dönme hızının artması ve geçiş hızının düşmesiyle artan ısı girdisi, kaynak bölgesinde malzemenin plastik deformasyonunu sağlayarak kaynak içi gerilme dağılımını düzenlemekte, mikroyapı kusurlarının azaltmakta ve dolayısıyla kaynak kalitesinin artmasına katkı sağlamaktadır. TIG+FSP kombinasyonu, dissimilar alüminyum alaşım çiftlerinin kaynak performansını

artırmak ve üretim süreçlerinde tercih etmek için etkili bir yöntemdir.

7. TIG + yaşlandırma işlemi, alaşımın sertliğinde ve mukavemetinde iyileşme sağlayarak kaynaklı bağlantıların mekanik performansını artırmaktadır. Optimum mekanik özellikler, düşük ve orta sıcaklıklarda gerçekleşen ısıl işlemlerle sağlanırken, yüksek sıcaklıklardaki ısıl işlemler tane büyümesi nedeniyle mekanik özelliklerin gerilemesine yol açmaktadır.
8. FSW bir katı hal kaynağı olduğundan alaşımların fiziksel durumunu etkilememektedir. Ayrıca kaynak bölgesinde ince ve eş eksenli tanecikler oluşturarak homojen ve dayanıklı bir mikro yapı sağlamaktadır. Bu nedenle kaynak bölgesi daha yüksek sertlik değeri ve yaklaşık iki kat daha yüksek tokluk değeri elde edilebilmektedir. Ancak takımın dönme hızının artışı, tane boyutunun artmasına ve mekanik özelliklerin düşmesine neden olmaktadır.

Kaynakça

1. Association, A. (1984). Aluminum: properties and physical metallurgy, ASM international.
2. Bao, Y., J. Zhou, Y. Zhang, Y. Xu and H. Liu (2021). "Microstructural and mechanical characteristics of direct laser welding 7075 super hard aluminum alloy/D6AC ultra-high strength alloy structural steel." Materials Letters **287**: 129312.
3. Bellamkonda, P. N., R. Addanki, M. Sudersanan, B. Visvalingam and M. Dwivedy (2024). "Optimization of process parameters of cold metal transfer arc

welding of AA 6061 aluminium Alloy-AZ31B magnesium alloy dissimilar joints using response surface methodology." International Journal of Lightweight Materials and Manufacture **7**(5): 738–752.

4. Çevik, B. (2018). "Gas tungsten arc welding of 7075 aluminum alloy: microstructure properties, impact strength, and weld defects." Materials Research Express **5**(6): 066540.
5. Dewangan, S., A. P. Reddy, S. S. S. Sunder, S. Legutko, J. Burja and U. Kumar (2024). "Mechanical property analysis into the welded plates of Al-6061 joined by TIG and FSW techniques." Journal of the Institution of Engineers (India): Series D **105**(3): 1703–1713.
6. Dwivedi, U., S. Tiwari, A. Mishra and S. Das (2020). "Comparative study of weld characteristics of Friction stir welded joints on aluminium 7075 with autogenous TIG." Materials Today: Proceedings **22**: 2532–2538.
7. Fouad, R. A., M. I. Habba, Y. G. Elshaghoul, M. M. El-Sayed Seleman, K. M. Hafez, F. Hamid and W. S. Barakat (2024). "The influence of various welding wires on microstructure, and mechanical characteristics of AA7075 Al-alloy welded by TIG process." Scientific Reports **14**(1): 19023.
8. Gao, Z., J. Zhang, X. Ba, Y. Liu, M. Huang and P. Wang (2025). "Experimental study on the low-power laser-TIG hybrid welding of SiCp/6061-T6 Al matrix composites." Optics and Lasers in Engineering **186**: 108861.

9. Hayat, F. (2022). "Electron beam welding of 7075 aluminum alloy: microstructure and fracture properties." Engineering Science and Technology, an International Journal **34**: 101093.
10. Ishak, M., N. F. M. Noordin and L. H. A. Shah (2015). "Feasibility study on joining dissimilar aluminum alloys AA6061 and AA7075 by tungsten inert gas (TIG)." Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering) **75**(7).
11. Ji, H., Y. Hu, R. Yu, S. Liu, W. Pei and B. Wang (2023). "Experimental study on TIG full welding and single pass welding quality of 6061-T6 aluminum alloy sheet." Journal of Materials Research and Technology **27**: 5965–5976.
12. Kaba, L., M. E. Djeghlal, S. Ouallam and S. Kahla (2022). "Dissimilar welding of aluminum alloys 2024 T3 and 7075 T6 by TIG process with double tungsten electrodes." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **118**(3): 937–948.
13. Kang, H., Y. Zhang, N. Zhang, K. Wang, J. Du and K. Ma (2024). "Microstructure and Mechanical Properties of 7075 Al Alloy TIG-Welded Joint with 7075 Al Alloy Wire as Filler." Transactions of the Indian Institute of Metals **77**(9): 2593–2599.
14. Karami, S., M. Yousefieh and H. Naffakh-Moosavy (2025). "The effect of laser welding parameters on mechanical properties and microstructure evolution of multi-layered 6061 aluminum alloy." Journal of Advanced Joining Processes **11**: 100275.

15. Kumar, P., A. Arif, A. C. V. Prasad, P. Danaiah, A. K. Singh, M. Patro, K. S. Kishore and M. Murugan (2021). "Study of Welding process parameter in TIG joining of Aluminum Alloy (6061)." Materials Today: Proceedings **47**: 4020–4025.
16. Kumar, R., G. Kumar, A. Roy, R. S. Sinha, S. M. Hasnain, O. Prakash and A. Ahmad (2022). "A comparative analysis of friction stir and tungsten inert gas dissimilar AA5082-AA7075 butt welds." Materials science for energy technologies **5**: 74–80.
17. Li, S., L. Liu, H. Liu, J. Yang, C. Liao, X. Wang and H. Dong (2025). "Effect of Welding Speed on the Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties of 6061/7075 Pulsed MIG Welded Joints." Journal of Materials Research and Technology.
18. Lv, X. and L. Liu (2022). "Characteristics of laser-offset-TIG hybrid welding of AZ31Mg alloy with 6061Al alloy via Zn filler." Optics & Laser Technology **152**: 108126.
19. Ma, G., X. Luo, D. Liu, C. Jia, F. Niu and D. Wu (2024). "7075 Aluminum alloy welded by laser-TIG hybrid with homogeneous filler wire: Microstructure evaluation and molten pool behavior." Optics & Laser Technology **169**: 110059.
20. Ma, G., K. Yue, D. Liu, R. Wang, F. Niu and D. Wu (2022). "Cracking susceptibility control of 7075 aluminum alloy in pulsed laser welding with filler strip." Optics & Laser Technology **152**: 108119.
21. Mehdi, H. and R. Mishra An experimental analysis and optimization of process parameters of AA6061

and AA7075 welded joint by TIG+ FSP welding using RSM, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8 (1), 598-620, 2022.

22. Mehdi, H. and R. Mishra (2021). "Effect of friction stir processing on mechanical properties and heat transfer of TIG welded joint of AA6061 and AA7075." Defence Technology **17**(3): 715–727.
23. Mehdi, H. and R. Mishra (2021). "Microstructure and mechanical characterization of tungsten inert gas-welded joint of AA6061 and AA7075 by friction stir processing." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications **235**(11): 2531–2546.
24. Mercan, E., Y. Ayan and N. Kahraman (2020). "Investigation on joint properties of AA5754 and AA6013 dissimilar aluminum alloys welded using automatic GMAW." Engineering Science and Technology, an International Journal **23**(4): 723–731.
25. Nagasai, B. P., A. Ramaswamy and J. Mani (2023). "Tensile properties and microstructure of surface tension transfer (STT) arc welded AA 6061-T6 aluminum alloy joints." Materials Today: Proceedings.
26. Patil, C., H. Patil and H. Patil (2016). "Experimental investigation of hardness of FSW and TIG joints of aluminium alloys of AA7075 and AA6061." Fracture and Structural Integrity **10**(37): 325–332.
27. Perander, L. (2021). Light metals 2021, Springer Nature.

28. Rahiman, M. K., S. Santhoshkumar and P. M. Kumar (2021). "Experimental analysis on friction stir welded AA 7075/AA 6061 using Taguchi grey relational analysis." Materials Today: Proceedings **45**: 3290–3295.
29. Rana, R., D. Karunakar, A. Karmakar and T. Mathew (2025). "Comparative analysis of microstructure evolution and Mechanical properties of dissimilar welded joints of AA7075/AA6061 via Friction Stir Welding, Tungsten Inert Gas Welding, and Tungsten Inert gas+ friction stir Processing." Journal of Materials Engineering and Performance **34**(6): 4633–4645.
30. Ren, Y., S. Liu and X. Hu (2025). "Effects of pre-weld 6061 base metal composition and post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of 7075/6061 dissimilar aluminum alloy FSW joints." Journal of Manufacturing Processes **153**: 452–470.
31. Ren, Y., S. Liu, X. Hu and W. Long (2025). "Effects of three different post-weld heat treatments on microstructure and properties of 7075/6061 friction stir welded joints." Materials & Design: 114242.
32. Reyaz, M. S. B. and A. N. Sinha (2024). "Improving tensile strength, impact toughness and wear resistance of TIG welded dissimilar AA7075-T6/AA6061-T6 joints through friction stir processing." International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) **18**(3): 1387–1400.

33. Reyaz, M. S. B. and A. N. Sinha (2025). "Parametric optimization and characterization of AA6061-T6 and AA7075-T6 tungsten inert gas welding joints subjected to friction stir processing." Journal of Materials Engineering and Performance **34**(2): 1258–1282.
34. Reyaz, M. S. B., A. N. Sinha, H. Mehdi and Q. Murtaza (2024). "Effect of pulsed TIG welding parameters on the microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar AA6061-T6 and AA7075-T6 weldments." Arabian Journal for Science and Engineering **49**(8): 10891–10911.
35. Sharma, V., M. P. Sharma and A. K. Jain (2025). "Effect of post-weld heat treatment on dissimilar AA2014-AA5083 friction stir welded joints." Journal of Alloys and Metallurgical Systems **10**: 100177.
36. Song, G., Z. Wang, Z. Liu and L. Liu (2022). "Effect of partial rolling on the microstructure and mechanical properties of laser-TIG hybrid welded joints of 7075-T6 aluminum alloy." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **121**(1): 589–599.
37. Temmar, M., M. Hadji and T. Sahraoui (2011). "Effect of post-weld aging treatment on mechanical properties of Tungsten Inert Gas welded low thickness 7075 aluminium alloy joints." Materials & Design **32**(6): 3532–3536.
38. Umer, M. Z. u. d. U. and A. A. Tihamiyu (2025). "X-ray microscopic and thermodynamic model assessments of softening in TIG-Welded AA 6061-

T651." Journal of Materials Engineering and Performance **34**(6): 5167–5183.

39. Vijayan, S., N. Subramanian and K. Sankaranarayanan (2021). Trends in Manufacturing and Engineering Management: Select Proceedings of ICMechD 2019, Springer.
40. Wang, G., R. Tian, J. Cao, Z. Xu, Z. Yao, H. Zhang and L. Yin (2024). "Effects of nano-modification on the microstructural evolution and mechanical properties of AA7075/AA6061 aluminum alloy joints fabricated by laser-MIG hybrid welding technique." Materials Today Communications **41**: 110959.
41. Wang, Z., Z. Zhang, Q. Lang, G. Song and L. Liu (2023). "Microstructure evolution and deformation behavior of TIG welded 7075-T6 aluminum alloy followed by partial hot rolling." Journal of Manufacturing Processes **94**: 524–538.
42. Xiao, L., W. Chenyang, L. Xiaoping, Z. Bin and L. Runzhou (2023). "Investigation of 7075 aluminum alloy TIG welding joint using 7075 aluminum alloy wire before and after heat treatment." Materials Research Express **10**(4): 046512.
43. Xie, J., C. Cai, B. Zhang, J. Yu, Y. Liu and H. Chen (2023). "Microstructure evolution and fracture behavior of rotating laser welded-brazed 6061 aluminum alloys/304 SS dissimilar joint." Materials Characterization **195**: 112543.
44. Yahaya, M. S., D. Kumar, S. T. Auwal, M. Mokoyo, A. S. Gambo, T. A. Umar and A. Tijjani (2024). "Optimization of TIG welding parameters for

enhanced mechanical properties of Al 7075 weldments." Kathmandu University Journal of Science Engineering and Technology **18**(2).

45. Yang, B., Z. Fu, T. Li, M. Shan, K. Guo, B. Chen, W. Lu, G. Gou and W. Gao (2020). "Microstructure and fracture toughness properties of CMT repairing welded 7075-T651 MIG welding joint." Materials Research Express **6**(12): 1265d1266.
46. Yelamasetti, B., M. Sandeep, S. S. Narella, V. V. Tiruchanur, T. Sonar, C. Prakash, S. Shelare, N. M. Mubarak and S. Kumar (2024). "Optimization of TIG welding process parameters using Taguchi technique for the joining of dissimilar metals of AA5083 and AA7075." Scientific Reports **14**(1): 23694.
47. Zhang, G., C. Xiao and O. O. Ojo (2021). "Dissimilar friction stir spot welding of AA2024-T3/AA7075-T6 aluminum alloys under different welding parameters and media." Defence Technology **17**(2): 531–544.

BÖLÜM 13

RF-ICP Plazma Tabanlı Toz Küreleştirme Teknolojisi

1. İRFAN ÜNAL¹

2. RAHİMİ ÜNAL²

Giriş

Eklemeli imalat (Eİ) yöntemi, karmaşık geometrilerin katmanlı olarak oluşturulmasına imkan tanıyan yöntemdir ve kullanım alanı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Geleneksel imalat teknolojilerine kıyasla tasarım özgürlüğünü, malzeme kullanım verimliliğini ve fonksiyonel iyileştirme potansiyelini önemli ölçüde artıran yenilikçi bir üretim yaklaşımıdır (Duan, Liu, Ran, Li ve Liu, 2017). Son yıllarda metal ve seramik esaslı toz malzemelerin kullanıldığı toz-yataklı füzyon, lazer sinterleme, elektron ışını ergitme ve bağlayıcı püskürtme gibi Eİ süreçlerinin endüstriyel ölçekte uygulanabilir hale gelmesi, bu yöntemlerin stratejik önemini daha da belirginleştirmiştir (Makhmutov ve diğerleri, 2021). Havacılık, savunma sanayi, enerji, biyomedikal ve otomotiv gibi yüksek

¹ Öğr.Gör. İrfan ÜNAL, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orcid: 0000-0002-9758-9848

² Prof. Dr. Rahmi ÜNAL, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-5379-5159

performans gerektiren sektörlerde, dar tane boyutu dağılımına, yüksek saflığa, iyi akışkanlığa ve kontrollü morfolojiye sahip tozlara olan gereksinim artmaktadır. Bu nedenle Eİ için kullanılan tozların fiziksel ve kimyasal özellikleri, üretilen parçaların mikro yapısını, yoğunluğunu, yüzey kalitesini ve mekanik performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda RF-ICP yöntemi, yüksek sıcaklıklı, inert ve temas gerektirmeyen bir plazma ortamı sunarak toz küreleştirme amacıyla öne çıkan ileri bir teknolojidir. RF-ICP, malzemenin 8.000–10.000 K seviyesine ulaşabilen kararlı plazma koşullarında tam ergimesine, yüzey oksitlerinin uzaklaştırılmasına ve homojen ısı dağılımının sağlanmasına imkan tanır. Böylece dar tane boyutu dağılımına, yüksek küreselliğe ve düşük safsızlık içeriğine sahip tozlar elde edilir. (Sun, Fang, Zhang ve Xia, 2017).

Metal tozları, özellikle titanyum alaşımları, nikel süperalaşımları, paslanmaz çelikler ve alüminyum bazlı sistemler gibi hafif ve yüksek dayanımlı malzemelerin üretiminde kritik rol oynamaktadır (Shanmugavelayutham ve Selvarajan, 2004). Seramik tozları ise yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal kararlılık, biyouyumluluk ve elektriksel özellikleri sayesinde fonksiyonel ve yapısal uygulamalarda önemli bir yer edinmiştir (Taylor ve Pirzada, 1994). Eklemeli imalatın sunduğu kişiselleştirilmiş üretim kabiliyeti, zirkonya, alümina ve hidroksiapatit gibi geleneksel seramiklerin yanı sıra ileri fonksiyonel seramiklerin karmaşık geometrilerde ekonomik biçimde üretilebilmesini mümkün kılmıştır.

Bu bağlamda, küresel şekilli toz elde etme teknolojileri Eİ süreçlerinin başarısında belirleyici bir etkiye sahiptir. Özellikle RF-ICP (Radyo Frekansı ile İndüktif Eşleşmeli Plazma) yöntemi, son yıllarda yüksek kalitede metal ve seramik tozlarının elde edilmesi açısından öne çıkan teknolojilerden biri olmuştur (Samal, 2017). RF-ICP plazma sistemleri, malzemenin yüksek sıcaklıklı ve temiz bir plazma ortamında ergitilmesini sağlayarak küresel morfolojiye sahip, dar tane boyutu dağılımlı, oksijen ve safsızlık içeriği düşük

tozlar üretme imkanı sunar (Polozov ve diğerleri, 2019; Tong, Lu, Liu, Wang ve Qu, 2015). Bu yöntem, temas gerektirmeyen ısıtma mekanizması sayesinde çapak, inklüzyon veya yüzey kusuru riskini minimize ederken, yüksek yüzey gerilimi ve hızlı katılma koşullarıyla Eİ için ideal akışkanlık ve paketlenme karakteristiklerine sahip tozların elde edilmesine olanak tanır (Capus, 2017). Ayrıca RF-ICP yöntemi, yüksek ergime sıcaklığına sahip süperalaşımlar ve gelişmiş seramik öncüllerinin işlenmesine elverişli olması nedeniyle hem araştırma hem de endüstriyel ölçekte geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

Uygun küresel özelliklere sahip olmayan tozlar, Eİ süreçlerinde katmanlar arası bağlanma yetersizliğine, gözeneklilik oluşumuna, yüzey pürüzlülüğünün artmasına ve mekanik özelliklerin istenen seviyeye ulaşamamasına neden olabilmektedir (Hartwig ve diğerleri, 1998; Sungail ve Abid, 2018). Bu nedenle, toz küreleştirme yöntemlerinin özellikle RF-ICP gibi yüksek kontrollü süreçlerin malzeme mikroyapısı ve proses kararlılığı üzerindeki etkileri dikkatle değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada, RF-ICP teknolojisinin çalışma mekanizması, ekipman bileşenleri, önemli proses parametreleri ve metal-seramik ayrımına bağlı işlem davranışları detaylı biçimde ele alınarak Eİ uygulamalarında yüksek kaliteli küresel toz eldesi için bilimsel ve teknik bir çerçeve sunulmaktadır.

RF-ICP YÖNTEMİ

RF-ICP yöntemi, metal ve seramik tozlarının küreleştirilmesinde, yüksek saflık, küresel morfoloji ve dar tane boyutu dağılımı sağlayabilen ileri bir plazma tabanlı üretim teknolojisidir. Ergimesi yüksek sıcaklık gerektiren metaller, metal alaşımları, seramik malzemeler ve oksidasyona duyarlı malzemelerin ergitilmesine olanak tanması nedeniyle Eİ uygulamaları için giderek daha kritik bir konuma ulaşmaktadır. RF-

ICP yöntemi, malzemeye temas gerektirmeyen bir yüksek enerjili plazma ortamında tozların ergitilmesi ve ardından plazma ortamından çıktıktan sonra toz ile ortamın yüksek sıcaklık farkından dolayı tozda meydana gelen yüksek yüzey gerilmesi ile tozun küreleştirilmesi esasına dayanır. Böylece üretilen tozlar yüksek küresellik, üstün yüzey kalitesi ve düşük oksit içeriği ile Eİ süreçlerine uygun özellikler sergiler (Sista, Moon, Sinha, Pirjade ve Dwarapudi, 2022).

RF-ICP YÖNTEMİ ÇALIŞMA PRENSİBİ VE EKLEMELİ İMALAT AÇISINDAN ÖNEMİ

RF-ICP yönteminin temel çalışma prensibi; bir indüksiyon bobinine uygulanan yüksek frekanslı alternatif akımın inert bir gaz akışında güçlü bir elektromanyetik alan oluşturmaktır. Bu alan, gaz içerisinde akım (eddy currents) oluşmasına neden olur. Akımlarının Joule ısıtması sonucunda gaz iyonlaşarak yüksek sıcaklıklı bir plazma haline gelir. Oluşan plazma sütunu, sıcaklığın 8.000-10.000 K değerini aştığı, yoğun enerji taşınımının gerçekleştiği ve kimyasal olarak oldukça saf bir çalışma ortamı sunan kararlı bir bölgedir. RF-ICP'nin karakteristik özelliği, ısı transferinin tamamen temassız bir mekanizma olan elektromanyetik indüksiyonla gerçekleşmesidir. Bu sayede ergitilecek malzeme hiçbir katı yüzeyle temas etmez, yüzey kontaminasyonu, inklüzyon ve safsızlık minimuma iner. Plazma sıcaklığı ve yoğunluğu, RF gücü ve gaz akış parametreleri ile hassas biçimde kontrol edilebilir. Oluşan plazma, yüksek saflık, homojen ısı dağılımı ve geniş sıcaklık aralığı nedeniyle Eİ için kullanılan küresel tozların hazırlanmasında kritik bir role sahiptir (Nkhasi, du Preez ve Bissett, 2021).

Plazma bölgesine beslenen düzensiz şekilli metal veya seramik tozları, yüksek sıcaklıklı iyonize gazla doğrudan etkileşerek tam ergime uğrar ve sıcaklık homojenleşmesi, yüzey oksitlerinin ayrılması ve kimyasal arıtım meydana gelir. Malzemenin plazma

içinde maruz kaldığı bu yüksek enerjili ortam, mikroyapısal iyileşme ve saflık artışı sağlaması nedeniyle Eİ için kullanılan malzemelerin kalite kontrolünde büyük avantaj sunar. Ergiyen tozların hızla katılaşması yüzey gerilmesi sağlar ve tozlar küreleşir. RF-ICP yöntemi, doğrudan toz üretim yöntemi ya da atomizasyon amacıyla kullanılmasa dahi eklemeli imalat malzemeleri için birçok yönden sağladığı avantajları ile kritik bir teknolojidir. Temassız ısıtma mekanizması, özellikle titanyum, nikel süperalaşimleri ve ileri seramiklerde oksitlenme ve kontaminasyonu minimuma indirir ve yüksek saflık oranına sahip olur (Naboychenko, 2009). Malzemenin plazma içinde eşit şekilde ısıtılması, mikroyapısal bütünlüğü ve kimyasal homojenliği artırır. Bu durum Eİ tozlarının yoğunluk, gözeneklilik ve faz kararlılığı açısından kritik rol oynar. Çok yüksek ergime sıcaklıklarına dayanıklı alaşımların ve seramiklerin küreleşmesini mümkün kılar. Refrakter metaller (W, Mo, Ta) ve ileri seramik sistemler RF-ICP'nin yüksek sıcaklık kapasitesi sayesinde güvenle küreleştirilebilir (Hao ve diğerleri, 2019). RF gücü, Gaz debisi, RF gücü, frekans, bobin tasarımı ve besleme hızının bağımsız kontrolü sayesinde hassas biçimde ayarlanabildiği için endüstriyel uygulamalarda yüksek tekrarlanabilirlik sağlar. Bu da Eİ malzemelerinde kalite yönetimi için temel bir gerekliliktir. Plazma ortamı, oksijen ve diğer reaksiyon ürünlerinin uzaklaştırılmasına yardımcı olarak yüksek saflık seviyelerine ulaşmayı ve stabiliteyi destekler.

Bu özellikler RF-ICP plazma yöntemini, eklemeli imalat için kullanılan metal ve seramik malzemelerin hazırlanmasında, arıtılmasında, ergitilmesinde ve mikroyapısal optimizasyonunda temel bir teknoloji haline getirmektedir.

RF-ICP SİSTEMİ EKİPMAN VE BİLEŞENLERİ

RF-ICP sistemleri çeşitli geometrilerde, boyutlarda ve kapasitelerde mevcut olmasına karşın, genel itibarı ile Şekil 1.'de

şematik çiziminde verildiği gibi RF güç kaynağı, indüksiyon bobini, plazma torçu, gaz besleme ve atmosfer kontrol sistemi, hammadde besleme ünitesi, soğutma ve koruma, vakum ünitesi, filtrasyon ünitesi, toz toplama sistemlerinden oluşur (Cheng, Choi ve Watanabe, 2013; Liu ve diğerleri, 2022).

RF güç kaynağı, plazmayı oluşturmak için gerekli yüksek radyo frekanslı enerjiyi sağlar. Güç seviyesi, plazmanın sıcaklığını ve kararlılığını doğrudan belirler. RF plazma sisteminde kullanılacak olan güç kaynağına bağlı olarak 10 kW altında çalışabildiği gibi 200-250 kW aralığında da çalışabilir. Plazmanın yoğunluğu, sıcaklığı ve kararlılığı doğrudan RF gücü ile kontrol edilir. Frekans seçimi, plazmanın sönümleme uzunluğu ve elektromanyetik kuplaj verimliliğini belirler.

İndüksiyon bobini, RF enerjisini elektromanyetik alana dönüştürerek plazmanın olduğu bölgeyi çevreler. Bobin geometrisi ve frekansı, plazmanın şekli ve yoğunluğunu etkiler. Genellikle bakırdan, su soğutmalı ve birkaç turdan oluşur. Bobinin oluşturduğu manyetik alan dağılımı, plazmanın geometrisini belirler. Bobin tasarımı ve sarım sayısı malzemenin plazmayla etkileşme süresi üzerinde belirleyicidir.

Gaz besleme ve atmosfer kontrol sistemi, plazma oluşturma, tozu plazma ortamına taşıma, tozların torç içinde hareketini kontrol etme gibi önemli etkileri vardır. Gaz saflığını, debiyi ve basıncı ayarlayarak plazmanın kimyasal stabilitesini korunur. Gaz saflığı (genellikle % 99.99) oksidasyonu önlemek için kritiktir. Çok aşamalı debi kontrol valfleri ile stabil akış sağlanır. Oksijen ppm seviyesinde kontrol edilir.

Hammadde besleme ünitesi, düzensiz şekilli metal veya seramik tozları kontrollü şekilde plazma bölgesine iletilmesini sağlar. Tozlar plazma bölgesine taşıyıcı gaz ile birlikte belirli bir

oranda beslenir. Besleme hızının dalgalanması plazma kararlılığını bozabileceğinden hassas servo motorlarla kontrol edilir.

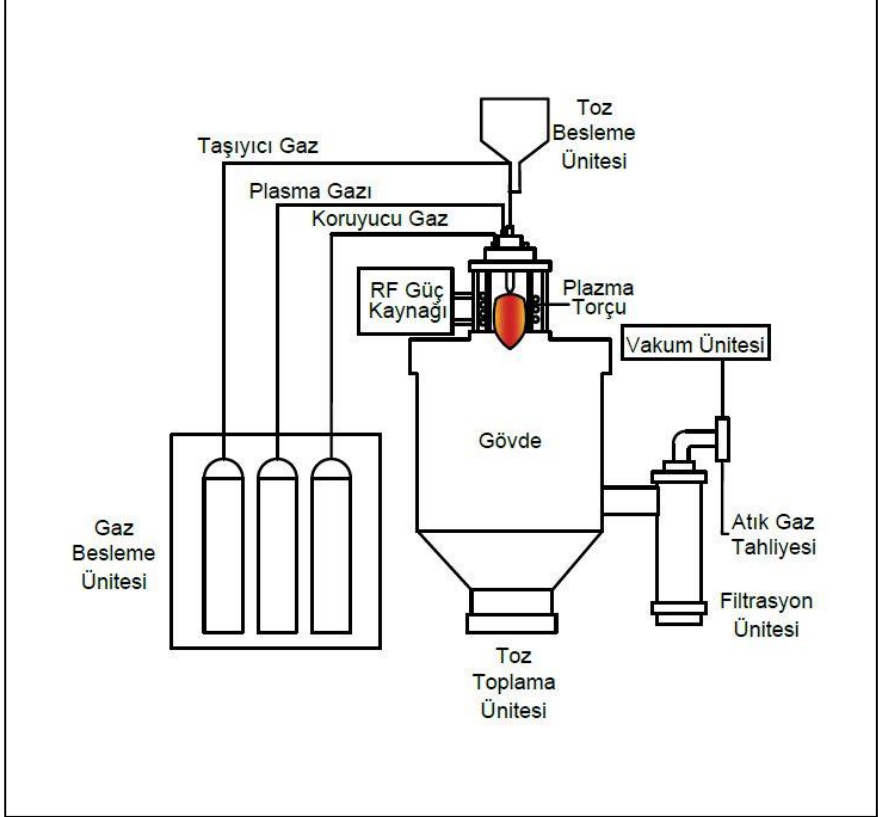
Soğutma ve koruma sistemleri, yüksek sıcaklıkların ekipmana zarar vermesini önler ve plazma stabilitesini sürdüren soğutma devrelerini içerir. Su soğutmalı bobin, torç ve reflektör kanalları bulunur. Optik emisyon spektroskopisi (OES) ile plazma sıcaklığı anlık izlenebilir. İnert atmosfer kaçaıklarını tespit eden sensörler bulunur.

Vakum ünitesi, sistem içindeki oksijen ve nemi uzaklaştırarak oksidasyonu önler, plazma stabilitesini artırır ve ergitme-sıkıştırma sürecinin kontrollü bir atmosferde gerçekleşmesini sağlar.

Filtrasyon ünitesi, prosten çıkan duman, buharlaşmış metal parçacıkları ve ince tozları tutarak hem çevreyi hem de ekipmanı korur, ayrıca geri kazanılabilir ince fraksiyonları ayırmaya yardımcı olur.

Toz Toplama Ünitesi: Kaba ve düzensiz şekilli tozların plazma ortamında küreleşen tozların toplandığı ünedir.

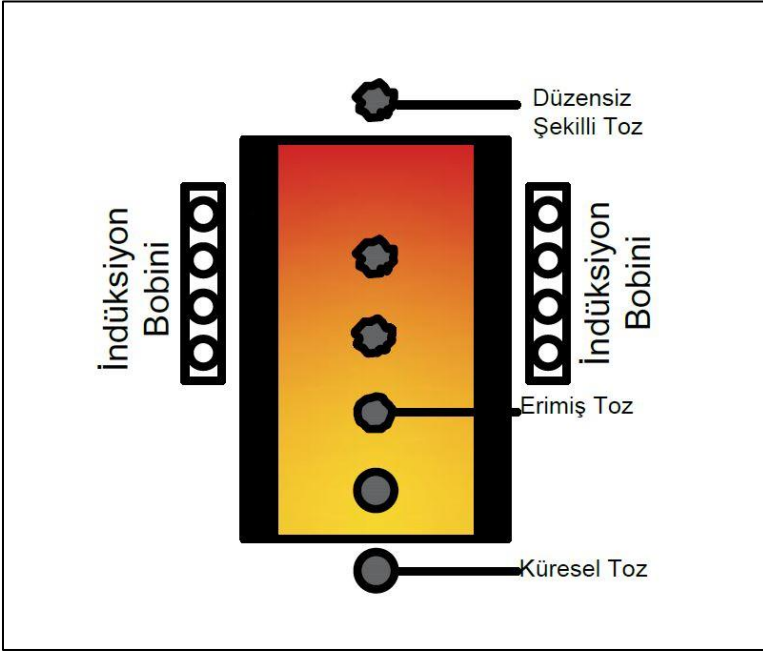
Şekil 1. RF-ICP Sistemi ve Ekipman Bileşenleri



Plazma Torçu: İnert gazın (argon, helyum veya karışım gazları) kontrollü akışıyla plazmanın oluştuğu fiziksel yapıyı sağlar. Torç geometrisi ve özellikleri, gaz dinamiklerini (Reynolds sayısı, debi, türbülans) ve plazmanın sıcaklık profilini etkiler (Voronov, Hoffmann, Buscher ve Engelhard, 2017). Torçu oluşturan malzemeler yüksek sıcaklığa dayanıklı seramikler veya refrakter malzemelerden seçilir. RF-ICP sisteminde düzensiz şekilli tozların taşıyıcı gaz ile birlikte plazma içerisine girdiği ergidiği bölüm olması plazma torçunu en önemli sistem bileşenlerinden biri olma durumuna getirmektedir. Şekil 2.'de 4 bobin sarımlı bir plazma torçu görülmektedir. Fakat çeşitli malzeme ve parametrelere göre sarım

sayısının farklılık gösterdiği plazma torçları da küresel toz elde edilmesinde kullanılmaktadır.

Şekil 2. RF-ICP Torçu



RF-ICP YÖNTEMİ PROSES PARAMETRELERİ

RF-ICP sistemlerinin performansı, uygulanan RF gücü, frekans, gaz türü ve debisi, toz besleme hızı gibi parametrelerle hassas biçimde kontrol edilir. Bu parametreler ile yapılan literatür çalışmaları incelenerek toz küreleşmesine etkilerinin endüstriyel ve laboratuvar ölçeğindeki türlerine ait tipik değer aralıkları aşağıda özetlenmiştir.

RF gücü: plazmanın sıcaklığını, yoğunluğunu ve ergitme yeteneğini doğrudan belirler. RF-ICP sistemleri güç kapasitelerine göre üç kategoride gruplandırılabilir. 10-30 kW değerleri arasındakiler laboratuvar ölçeği, 30-60 kW değerleri arası pilot ölçeği, 60-250 kW arası güç aralıklı sistemler ise endüstriyel ölçek

olarak gruplandırılmaktadır (Tekna, 2025). Güç arttıkça plazma sütununun kararlılığı yükselir, ısı dengelenme hızlanır ve yüksek ergime noktalarına sahip malzemelerin küreleşmesi kolaylaşır. Hao ve ekibi tarafından yapılan çalışmada güç değerinin 19 kW değerinden 43 kW değerine çıkması toz küreleşmeyi %50 arttığını belirtmişlerdir (Hao ve diğerleri, 2019). Buna karşın yüksek güç artışı buharlaşma problemlerini de beraberinde getirebileceği için optimum bir güç değeri belirlenmesi önemlidir.

RF-ICP Frekansı: RF-ICP sistemlerinde frekans, elektromanyetik indüksiyonun etkinliğini ve plazma içerisindeki enerji dağılımını belirler. Tipik frekans aralığı; 1–5 MHz değerleridir. Düşük frekanslar (1–2 MHz), daha derin nüfuz eden manyetik alan sayesinde daha geniş plazma hacimleri üretirken; yüksek frekanslar (3–5 MHz) daha yoğun ve kararlı bir plazma sütununa olanak tanır (Taylor ve Pirzada, 1994).

Gaz Türü ve Debisi: RF-ICP sisteminde torça taşıyıcı gaz, plazma gazı ve koruyucu gaz verilmektedir. Torça beslenen bu gazların üçü aynı gaz türü olabileceği gibi farklı gaz türleri de olabilmektedir. Bu gazların her birinin ayrı görevi bulunmaktadır. Taşıyıcı gaz ile düzensiz şekilli tozlar, torç içi plazma ortamına taşınır. Plazma gazı, plazmayı oluşturan gazdır. RF plazmanın en önemli parametrelerinden biri plazma gazı türü ve debisidir. Koruyucu gaz ise torç geometrisinin iç yüzeyinden belirli bir debide sisteme beslenerek yüzeyleri yüksek sıcaklıklardan korumaktadır. Bu gazların debileri, plazma geometrisini, sıcaklık dağılımını ve malzemenin plazma sütununda kalma süresini belirler. RF-ICP plazmanın oluşturulmasında genellikle inert gazlar kullanılmasına karşın; RF-ICP plazmasının önemli avantajlarından biri, farklı reaktif ve inert gazları kullanabilmesine olanak sağlamasıdır. Hava, argon, azot, hidrojen, helyum gibi çeşitli gazlar plazma üretimi için kullanılan gaz seçeneklerini oluşturmaktadır (Ananthapadmanabhan ve Venkatramani, 1999). Kullanılacak olan plazma gazları türlerine

göre farklı etkileri olmaktadır. Argon gazı yüksek stabilitesi ve diğer gazlara oranla düşük maliyeti ile yaygın olarak kullanılmaktadır (Bonizzoni ve Vassallo, 2002). Helyum gazı ise daha yüksek sıcaklık ve daha yüksek ısıl iletkenlik özellikleri sebebi ile kullanılmaktadır. Bazı uygulamalarda Argon ve Helyum karışımları stabilite ve sıcaklık dengesi sağlamak amacı ile birlikte kullanılmaktadır (Polozov ve diğerleri, 2019). Yapılacak işleme göre uygun plazma gazı seçmenin yanında, plazma gazı debilerinin optimum değerlerde olması önemlidir. Literatür çalışmaları incelendiğinde; tipik gaz debisi aralıkları birçok proses parametresine göre değişiklik gösterse de, genel olarak Argon gazı için 10–40 L/dk, Helyum gazı için 5–20 L/dk, karışım gazları için kendi aralarından oransal karışımı miktarına bağlı olarak 10–50 L/dk değerleri arasında seçilmiştir (Polozov ve diğerleri, 2019).

Toz Besleme Hızı: RF-ICP plazma sisteminde malzeme besleme hızının stabil olması plazma kararlılığı için kritiktir. Toz malzemeler taşıyıcı gaz ile birlikte belirli oranlarda torça beslenmektedir. Belirli bir tane boyutuna sahip tozlar ve belirli bir plazma gücü için sadece toz besleme hızındaki bir artışın toz küreselleştirme yüzdesinde azalmaya yol açtığı literatürde yer alan birçok çalışmanın ortak sonucu olarak ortaya çıkmaktadır (Li, Hao, Shu ve He, 2020; Tong ve diğerleri, 2015). Buna karşın düşük toz besleme hızlarında ise tozların aşırı buharlaşması ve düşük verime neden olmaktadır. İyi bir toz küreleşmesinin sağlanması için ideal toz besleme hızının belirlenmesi gereklidir (Yan ve diğerleri, 2021). Toz besleme hızı malzeme türüne, plazma gazı özelliklerine göre değişkenlik göstermesine karşın, tipik besleme hızları genel olarak; metal malzemeler için 10–50 g/dk aralığında iken; seramik tozlar için 5–20 g/dk (daha düşük dayanım ve ergime davranışı nedeniyle) ideal toz besleme hızlarıdır (Sista ve diğerleri, 2022).

RF-ICP YÖNTEMİ İLE METAL VE SERAMİK TOZU KÜRELEŞTİRME

RF-ICP yöntemi ile metal ve seramik malzemelerin ısıtılma, ergime, buharlaşma gibi süreçlerinde farklı fiziksel mekanizmalara sahiptirler. Eklemeli imalat için malzeme türlerine bağlı istenilen toz özelliklerine göre tozlar küreleştirilir.

RF-ICP yöntemi metal malzemeler için; saflık artırma, oksit tabakasını giderme, tam ergime ve kimyasal homojenleşme ve faz segregasyonunun azaltılması işlevlerini yerine getirir. Saf metaller ve alaşımları Eİ için ideal hale gelir. Metaller, yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahip olduklarından plazma içerisinde hızlı bir şekilde Joule ısıtması ile ergirler. Bu özellik Eİ için aşağıda belirtilen avantajları sağlar:

- Homojen ergime: Titanyum, nikel süperalaşımları, Inconel, Co–Cr gibi alaşımlar plazmada kararlı şekilde ısınır.
- Oksit ve inklüzyonların giderilmesi: Plazma ortamı çok düşük oksijen içerdiğinden yüzey oksitleri ayrıştır ve malzeme saflığı artar.
- İyi akışkanlık ve yüksek yüzey gerilimi: Eİ tozlarına uygun mikroyapı hazırlığını kolaylaştırır.
- Özellikle titanyum ve alüminyum gibi oksidasyona duyarlı metallerde RF-ICP'nin kimyasal saflık avantajı belirginleşir.

Literatürde RF-ICP yöntemi ile çok sayıda deneysel metal tozu küreleştirme işlemi yapıldığı görülmektedir (Sista ve diğerleri, 2022). Bu deneysel çalışmalar incelendiğinde metal malzemelerin istenilen küreleşmeyi sağlaması için kullanılan RF-ICP yönteminin parametre ve özelliklerinin aşağıda verildiği gibi olduğu görülmüştür:

- Yüksek RF gücü (40-120 kW),
- Argon ağırlıklı atmosfer,
- 1-3 MHz frekans aralığı,
- Yüksek besleme hızlarının olması gerektiği görülmektedir.

Seramikler malzemeler için ise Eİ yöntemlerinde tozların faz dönüşümlerinin kontrol altına alınması (ör. zirkonya için tetragonal-kübik faz kararlılığı), mikro-yoğunluk artırma, uçucu bileşenlerin uzaklaştırılması ve yüzey kusurlarının ve çatlak başlatıcılarının giderilmesi çok önemlidir (Piconi ve Maccauro, 1999). RF-ICP yöntemi ile bu şartlar sağlamakta ve Eİ çalışmalarına yönelik seramik malzemelerin işlem stabilitesini iyileştirmektedir. Seramik malzemeler (Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4 , SiC vb.) düşük elektriksel iletkenliğe sahip oldukları için metallerde olduğu gibi hızlı indüksiyon ısınması göstermezler; plazma içerisindeki enerji, iyon bombardımanı ve radyasyon ile iletilir. Bu nedenle seramiklerin işlem davranışı daha farklıdır (Kong ve Lau, 1990; Kumar, Selvarajan, Padmanabhan ve Sreekumar, 2006).

Seramik tozlar için RF-ICP yönteminin karakteristikleri:

- Yüksek ergime noktaları nedeniyle daha yüksek plazma sıcaklığı gerektirir (genellikle He katkılı gaz karışımı tercih edilir).
- Isıl iletkenlik düşüktür, bu nedenle malzeme daha yavaş ısınır.
- Termal şok hassasiyeti yüksektir.
- Kimyasal kararlılıkları yüksek olduğundan oksitlenme/indirgenme süreçleri sınırlıdır.

Seramikler için kritik parametre gereksinimleri:

- Daha yüksek RF gücü (60–150 kW)
- Helyum katkılı atmosfer (en az %20–40 He)
- 3–5 MHz frekans (enerji yoğunluğunu artırır)
- Düşük besleme hızları

Bu koşullar, seramiklerin Eİ için hazırlık süreçlerinde (ör. faz stabilizasyonu, yüzey arıtımı veya ön-ergitme) RF-ICP yöntemini etkili bir teknik haline getirir.

SONUÇ

Bu çalışmada, RF-ICP yöntemi ile metal ve seramik tozlarının eklemeli imalat (Eİ) uygulamaları açısından önemi kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. Elde edilen bulgular, RF-ICP teknolojisinin hem metal hem de seramik tozların küreleştirilmesinde kritik avantajlar sağladığını göstermektedir. Özellikle temassız ısıtma mekanizması, yüksek sıcaklık kapasitesi ve kontrollü plazma ortamı sayesinde, küresel morfolojiye sahip, dar tane boyutu dağılımlı, yüksek saflıkta ve düşük oksijen içeriğine sahip tozlar elde edilebilmektedir. Bu tozlar, Eİ süreçlerinde daha homojen katmanlar, daha yüksek yoğunluk ve geliştirilmiş mekanik performans gibi doğrudan uygulama faydaları sunmaktadır.

RF-ICP yönteminin metal ve seramik malzemelerdeki davranış farklılıkları detaylı olarak ortaya konmuş ve malzeme türüne özgü proses parametrelerinin (RF gücü, frekans, gaz türü ve debisi, malzeme besleme hızı) belirleyici rol oynadığı vurgulanmıştır. Metaller için homojen ergime, oksit ve inklüzyon giderimi ile iyi akışkanlık sağlanırken, seramiklerde faz dönüşümlerinin kontrolü, uçucu bileşenlerin uzaklaştırılması ve termal şok hassasiyetinin yönetimi ön plana çıkmaktadır. Bu farklılıklar, RF-ICP teknolojisinin Eİ malzemelerinin mikroyapısal ve kimyasal kalitesini optimize etmede esnek ve etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

RF-ICP yöntemi ile Eİ süreçlerinde deforme olmuş ve küreselliğini kaybetmiş olan tozların da yeniden küreleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum geri dönüşüme katkı yapmakta ve toz israfının önüne geçilmesini sağlamaktadır.

Kaynakça

- Ananthapadmanabhan, P. V. ve Venkatramani, N. (1999). Chapter 6 Thermal plasma processing. *Pergamon Materials Series*, 2(C), 121–150. doi:10.1016/S1470-1804(99)80052-2
- Bonizzoni, G. ve Vassallo, E. (2002). Plasma physics and technology; Industrial applications. *Vacuum*, 64(3–4). doi:10.1016/S0042-207X(01)00341-4
- Capus, J. (2017). Titanium powder developments for AM – A round-up. *Metal Powder Report*, 72(6), 384–388. doi:10.1016/j.mprp.2017.11.001
- Cheng, Y., Choi, S. ve Watanabe, T. (2013). Synthesis of niobium boride nanoparticle by RF thermal plasma. *Journal of Physics: Conference Series* içinde (C. 441). doi:10.1088/1742-6596/441/1/012031
- Duan, H. ping, Liu, X., Ran, X. zhe, Li, J. ve Liu, D. (2017). Mechanical properties and microstructure of 3D-printed high Co–Ni secondary hardening steel fabricated by laser melting deposition. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 24(9). doi:10.1007/s12613-017-1492-4
- Hao, Z., Fu, Z., Liu, J., Zhu, X., Zhou, F., Shu, Y., ... He, J. (2019). Spheroidization of a granulated molybdenum powder by radio frequency inductively coupled plasma. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 82, 15–22. doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.03.023
- Hartwig, T., Veltl, G., Petzoldt, F., Kunze, H., Scholl, R. ve Kieback, B. (1998). Powders for metal injection molding. *Journal of the European Ceramic Society*, 18(9), 1211–1216. doi:10.1016/S0955-2219(98)00044-2
- Kong, P. C. ve Lau, Y. C. (1990). Plasma synthesis of ceramic

- powders. *Pure and Applied Chemistry*, 62(9), 1809–1816. doi:10.1351/PAC199062091809
- Kumar, S., Selvarajan, V., Padmanabhan, P. V. A. ve Sreekumar, K. P. (2006). Spheroidization of metal and ceramic powders in thermal plasma jet: Comparison between experimental results and theoretical estimation. *Journal of Materials Processing Technology*, 176(1–3), 87–94. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.02.023
- Li, J., Hao, Z., Shu, Y. ve He, J. (2020). Fabrication of spherical Ti–6Al–4V powder for additive manufacturing by radio frequency plasma spheroidization and deoxidation using calcium. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 14792–14798. doi:10.1016/j.jmrt.2020.10.054
- Liu, X., Wang, K., Chen, Q., Zhang, B., Hao, P., Wang, Y. ve Wang, Q. (2022). Controllable Preparation of Spherical Molybdenum Nano-Powders by One-Step Reduction of APM in Radio Frequency Hydrogen Plasma. *Materials*, 15(6). doi:10.3390/ma15062019
- Makhmutov, T., Razumov, N., Kim, A., Ozerskoy, N., Mazeeva, A. ve Popovich, A. (2021). Synthesis of CoCrFeNiMnW0.25 High-Entropy Alloy Powders by Mechanical Alloying and Plasma Spheroidization Processes for Additive Manufacturing. *Metals and Materials International*, 27(1), 50–54. doi:10.1007/S12540-020-00747-0
- Naboychenko, S. S. (2009). Reduction methods of powder production. *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*, 163–180. doi:10.1016/B978-1-85617-422-0.00008-2
- Nkhasi, N., du Preez, W. ve Bissett, H. (2021). Plasma spheroidisation of irregular Ti6Al4V powder for powder bed fusion. *Metals*, 11(11). doi:10.3390/met11111763
- Piconi, C. ve Maccauro, G. (1999). Zirconia as a ceramic biomaterial. *Biomaterials*. doi:10.1016/S0142-9612(98)00010-6
- Polozov, I., Razumov, N., Makhmutov, T., Silin, A., Kim, A. ve

- Popovich, A. (2019). Synthesis of titanium orthorhombic alloy spherical powders by mechanical alloying and plasma spheroidization processes. *Materials Letters*, 256. doi:10.1016/j.matlet.2019.126615
- Samal, S. (2017). Thermal plasma technology: The prospective future in material processing. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3131–3150. doi:10.1016/j.jclepro.2016.10.154
- Shanmugavelayutham, G. ve Selvarajan, V. (2004). Plasma spheroidization of nickel powders in a plasma reactor. *Bulletin of Materials Science*, 27(5). doi:10.1007/BF02708563
- Sista, K. S., Moon, A. P., Sinha, G. R., Pirjade, B. M. ve Dwarapudi, S. (2022). Spherical metal powders through RF plasma spherodization. *Powder Technology*, 400. doi:10.1016/j.powtec.2022.117225
- Sun, P., Fang, Z. Z., Zhang, Y. ve Xia, Y. (2017). Review of the Methods for Production of Spherical Ti and Ti Alloy Powder. *JOM*, 69(10), 1853–1860. doi:10.1007/S11837-017-2513-5/TABLES/1
- Sungail, C. ve Abid, A. (2018). Spherical tantalum feed powder for metal additive manufacturing. *Metal Powder Report*, 73(6), 316–318. doi:10.1016/j.mprp.2018.03.046
- Taylor, P. R. ve Pirzada, S. A. (1994). Thermal plasma processing of materials: A review. *Advanced Performance Materials*. doi:10.1007/BF00705312
- Tekna. (2025, Aralık). Tekna,spheroidization systems. <https://www.tekna.com/spheroidization-systems>.
- Tong, J. B., Lu, X., Liu, C. C., Wang, L. N. ve Qu, X. H. (2015). Fabrication of micro-fine spherical high Nb containing TiAl alloy powder based on reaction synthesis and RF plasma spheroidization. *Powder Technology*, 283, 9–15. doi:10.1016/j.powtec.2015.04.062
- Voronov, M., Hoffmann, V., Buscher, W. ve Engelhard, C. (2017). Computational model of inductively coupled plasma sources in comparison to experimental data for different torch designs and

plasma conditions. Part II: Theoretical model. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 32(1).
doi:10.1039/c6ja00192k

Yan, Z., Xiao, M., Mao, X., Khanlari, K., Shi, Q. ve Liu, X. (2021). Fabrication of spherical WC-Co powders by radio frequency inductively coupled plasma and a consequent heat treatment. *Powder Technology*, 385, 160–169.
doi:10.1016/j.powtec.2021.02.075

BÖLÜM 14

NİKEL ESASLI ALAŞIM VE KOMPOZİTLER *NICKEL BASED ALLOYS AND COMPOSITES*

Fevzi KELEN¹

¹ Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Van, Türkiye, fkelen@yyu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3900-4503.

1. Giriş

Tarihi milattan önce üç bin beş yüzü yıllara kadar uzanan nikel yer kürenin ortalama %0.008'ini oluşturmaktadır. 1751'de İsveçli kimyager Baron Axel Frederik Cronstedt tarafından ilk kez keşfedilmiş olmasına karşın 1597 yapımı "Pai-thung" olarak adlandırılan bir alaşımda gerçekleştirilen elementel analizde %18.75 oranında yer aldığı saptanmıştır. Diğer taraftan suriyede tarihi eser niteliğindeki bronzda yapılan morfolojik incelemede %2 civarında nikle rastlanılmıştır. Titanyumdan sonra yeryüzünde en çok bulunan nikel gümüşümsü beyaz renkte olup, doğada bileşik halindedir. Lateritik ve sülfidik önemli rezerv yataklarıdır. Nikelin (NiAs), kloantit (NiAs₂), pentlandit [(FeNi)S], millerit (NiS), anaberjit [(Ni)₃(AsO₄)₂₈H₂O] ve garniyerit [(NiMg)₃Si₂O₅(OH)₄] ise ticari değere sahip kritik mineral kaynaklarıdır. 1865 yılında mühim cevher yataklarının ortaya çıkarılması ile endüstriyel ölçekte üretimine başlanmıştır. Bu tarihten itibaren birçok farklı alanda kullanılmıştır. Tüketim hacmi alaşım elementi olarak sarf edilemesi ile artmıştır. 1890'da çeliklerde mukavemet ve tokluğa yaptığı olumlu katkının tespit edilmesi ile birlikte popülerite kazanmıştır. Bu nedenle dünya nikel üretiminin yaklaşık %66'sı paslanmaz çelik eldesinde gerçekleşmiştir. Diğer kısmı ise korozyona karşı yüksek direnç gerektiren sektörlerde olmuştur. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda sergilediği mükemmel dayanım içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri, jet motorları, termik santraller ve nükleer reaktörlerde yaygın olarak kullanımına yol açmıştır. Nikel mevcut sektörlerin haricinde sahip olduğu üstün fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı inşaat, gemi, elektrik, elektronik, tıp ve iletişim gibi pekçok farklı iş kollarında da uygulamalara sahiptir (Cronstedt et al. 1751, Fyfe 1822, Thomason 1845, Fraser 1952, Rosenberg 1968, Mudd 2007a, 2007b, 2009, 2010, Lippold et. al. 2011, Hausinger 2013, Howard-White 2024). Yüksek yoğunluğu önemli bir dezavantaj teşkil eden nikel yoğunluk şekil değişimine uygun sünek bir malzemedir. Peryodik tablonun VIIIB grubunu demir ve kobalt aileleri ile birlikte meydana getirmektedir. Ferromanyetik karakteristiğın yanı sıra nispeten yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahiptir. Geçiş metalleri arasında yer alan nikel atmosfer ve su korozyonuna karşı son derece dayanıklıdır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda iyi mukavemet kritik bir diğer spesifiktir. Bu özellikler paslanmaz çelik eldesinde, farklı metallerin alaşımlandırılmasında, batarya üretiminde, kaplama uygulamalarında ve alaşımlı çeliklerin imalatında kullanımlarına olanak tanımıştır. Özellikle iyi şekillendirilebilirlik ve yüksek dayanım kompozit yapımında önemli bir avantaj sağlamıştır. İkincil takviye materyali olarak sarf edilmesi halinde karma malzemelerde istenilen nihai fiziksel ve mekaniksel davranışlara ulaşılmasını mümkün kılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda nadiren saf halde kullanılmaktadır (Barcelou ve Barceloux 1999, Bassford ve Hosier 2002). Aşağıda yaygın tüketime sahip nikel alaşımlarına sırası ile kısaca değinmiştir.

2. Nikel alaşımlar

Ticari saflıktaki nikel üstün karakteristik özelliklerinden dolayı çoğunlukla demir esaslı malzemelerde alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bakır, krom, alüminyum, kurşun, kobalt, gümüş ve altın ile yapılan türleri de bulunmaktadır. Tablo 1'de kimyasal kompozisyonları verilen 200, 201, 300 (permanickel) ve 301 (duranickel) alaşımlarından 200 ve 201 serileri %99'un üzerinde ağırlıkça nikel içerir iken %0.23 mangan, %0.03 silisyum ve sırası ile %0.07 ve %0.01 oranlarında karbon ihtiva etmektedir. Diğerk taraftan 204 ve 205 kodlularda 200 ve 201 ile oldukça yakın muhteviyata sahiptir. Bu malzemeler genel olarak yüksek korozyon mukavemeti ve nispeten iyi mekanik davranışlar sergilemektedir. Nikel 200 alaşım yüksek sıcaklıklarda iyi dayanım göstermesine karşın 201'den daha fazla karbon bulundurması nedeni ile nadiren tüketilmektedir. 204 ve 205 dizileri ise elektrik ve elektronik aygıtlarda sıklıkla sarf edilmektedir. Ayrıca 211, 220 ile 230, 233 ve 270 alaşımları sırası ile yüksek sıcaklıklarda kükürtlü bileşiklere karşı mükemmel dayanımlarda, katot yapımlarında, vakum ve hidrojen tp imalatlarında kullanılmaktadır. 300 (permanickel) ve 301 (duranickel) nikel alaşımları ise yüksek korozyon dayanımları ile dikkat çekmektedir. Bunlardan düşük alaşım miktarlı permanickel saf nikelin kalıtsal niteliklerinin önemli bir kısmına haizdir. Yaşlandırma ısıı işlemine uygun bu seri genellikle katı hal kapasitörleri, diyafram, yay, klips ve yakıt hücrelerinde tüketilmektedir. Duranickel ise iyi mekanik karaktaristikleri ile kalıp, ekstrüzyon pres elemanları, yay, diyafram ve klipslerde tercih edilmektedir. Alüminyum ve titanyum ilaveleri ile ısıı işlem için uygun duruma getirilebilmektedir (Rosenberg 1968, Mankins and Lamb 1990, Heubner 2000, Kutz 2002, Farrer 2004, Everhart 2012, Smith and Baker 2015). Ayrıca nikel alaşım serilerinden nikel-bakır, nikel-krom-demir, nikel-demir-krom, nikel-demir, nikel-krom-molibden ve dispersiyon ile güçlendirilmiş veya mekanik alaşımla yöntemi ile üretilmiş nikel toz alaşımlarında mevcuttur. Bunlardan bakır ihtiva edenler yüksek toklukları ile ön plana çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda iyi dayanım ve yüksek kaynakedilebilirlik gibi spesifik özelliklere sahiptir. Ancak bunları asıl cazip kılan karakteristik mükemmel korozyon dirençleridir. Monel 400, 404, R-405 ve K-500 yaygın olarak bilinen tipik alaşım örnekleridir. Nikel-krom-demir serisi yüksek tokluklarının yanı sıra iyi dayanım ve yüksek korozyon mukavemetleri ile dikkat çekmektedir. Bu alaşım ailesine, dahası, farklı tür elemanlar ilave edilerek üstün spesifik nitelikler kazandırılabilir. Inconel 600, 601, 690, 706, 718, 783, X-750, 903, 907 ve 909 alaşım türleridir. Nikel-demir-krom dizisi yüksek sıcaklıklarda sergiledikleri mükemmel mukavemet ile bilinmektedir. Bu alaşımlar iyi oksidasyon dirençleri ile atmosfere açık uygulamalarda sarf edilmektedir. Incoloy 800, 800H, 825, 925, pyromet 860 ve refractaloy 26 en yaygın olanlarıdır. Nikel-demirliiler düşük genleşme katsayısına sahiptir. Nilo 36 ve 42 tipik örnekleridir. Bunlar uçak gövde parça ve bileşenler, yarı iletken

malzemeler ve sızdırmazlık elemanlarında çoğunlukla tercih edilmektedir. Nikel-krom-molibden ailesi yüksek korozyon dayanımı gerektiren koşullar için tasarlanmıştır. Bu alaşım kodlular yüksek sıcaklıklarda mükemmel dayanım ve saldırgan ortam ve çevrelere karşı oldukça yüksek dirençleri ile ün edinmiştir. Hastelloy X, C, C-276, G, Inconel 617 ve 625, MAR-M-252, Rene 41, Rene 95, Astroloy, Udimet 500, 520, 600 ve 700 ile Unitemp 1753 ve Waspaloy nikel bazlı alaşımlarıdır (ASM Specialty Handbook 2000, Smith et. al. 2001, Sigel et. al. 2007, Habashi 2008, Kunlong 2024). Tablo 2'de önemli bazı nikel esaslı alaşımlara ait mekanik özellikler verilmiştir.

Nikel-bakır alaşımları

Nikel-bakır esaslı alaşımların en yaygını monel üçte iki oranda nikel ve üçte bir oranda ise bakırdan oluşmaktadır. Birbiri içerisinde her oranda çözünebilen nikel-bakır ailesi yüksek mukavemet, mükemmel korozyon dayanımı ve iyi süneklik gibi üstün karakteristikler ile tanımlanmaktadır. Ayrıca mukavemet değerleri alüminyum ve titanyum ilavesi ile arzulanan seviyelere getirilebilmektedir. Nikel-bakır serisi pompa yapımında, vana imalatında, yağ rafinasyonlarında, yüksek aşındırıcı ve oksitleyici ortam ve çevrelere maruz kalan araç ve gereçlerde ve mimari yapılarda oldukça sık sarf edilmektedir.

Nikel-krom-demir alaşımları

Yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı gösterdikleri mükemmel direnç ile ön plana çıkan nikel-krom-demir serisi inconel alaşımları ile ün edinmiştir. Nikel içeriği %50-80 arasında olan dizinin dayanım ve korozyonu diğer alaşım elementleri ile artırılabilir. Bunlar elektronik parça, eşanjör bileşenleri, gıda işleme ekipmanları, armatür, reaktör aksamaları, yaylar, gaz türbünleri, pompa gövdeleri, roket motorları, uzay araçları ve kalıp yapımında kullanılmaktadır. Yüksek tokluklarının yanı sıra iyi süneklik ve kaynak edilebilirlik özelliklerine sahiptir.

Nikel-demir-krom alaşımları

Nikel-bakır ve nikel-krom-demir alaşımlarına göre daha az oranda nikel içeren nikel-demir-krom serisi yüksek sıcaklıklarda paslanmaya karşı iyi dayanım sergilemeleri ile popülerdir. Incoloy 800H, 825, 925, pyromet 860 ve refractaloy 26 alaşımları tipik örnekleridir. Bunlar ısı eşanjörleri, gaz soğutmalı nükleer reaktör, enerji üretimi, kimyasal proses ekipmanları, pervane milleri, soğuk işlenmiş borular, tankerler, vana gövdeleri, gaz türbünleri, civatalar ve yapısal elemanlarda kullanılmaktadır. Nikel – demir-krom alaşımları yüksek korozyon dayanımlarının yanı sıra nispeten iyi mukavemetleri ile dikkat çekmektedir. Spesifik karakteristikleri pek çok farklı alanda tüketilmelerini sağlamıştır.

Tablo 1. Nikel Esaslı Malzemelerin Kimyasal Bileşimi

<i>Alaşım</i>	<i>Ni</i> [*]	<i>Cu</i> [*]	<i>Fe</i> [*]	<i>Cr</i> [*]	<i>Mo</i> [*]	<i>Al</i> [*]	<i>Ti</i> [*]	<i>Nb</i> [*]	<i>Mn</i> [*]	<i>Si</i> [*]	<i>C</i> [*]	<i>Diğer</i> [*]
<i>Nikel</i>												
Nikel 200	99.6	-	-	-	-	-	-	-	0.23	0.03	0.07	-
Nikel 201	99.7	-	-	-	-	-	-	-	0.23	0.03	0.01	-
Permanickel 300	98.7	-	0.02	-	-	-	0.49	-	0.11	0.04	0.29	0.38 Mg
Duranickel 301	94.3	-	0.08	-	-	4.44	0.44	-	0.25	0.50	0.16	-
<i>Nikel-Bakır</i>												
Monel 400	65.4	32	1.00	-	-	-	-	-	1.00	0.10	0.12	-
Monel 404	54.6	45.3	0.03	-	-	-	-	-	0.01	0.04	0.07	-
Monel R-405	65.3	31.6	1.25	-	-	0.1	-	-	1.00	0.17	0.15	0.04 S
Monel K-500	65.0	30	0.64	-	-	2.94	0.48	-	0.70	0.12	0.17	-
<i>Nikel-Krom-Demir</i>												
Inconel 600	76	0.25	8.0	15.5	-	-	-	-	0.5	0.25	0.08	-
Inconel 601	60.5	0.50	14.1	23.0	-	1.35	-	-	0.5	0.25	0.05	-
Inconel 690	60	-	9.0	30	-	-	-	-	-	-	0.01	-
Inconel 706	41.5	0.15	40	16	-	0.20	1.8	3	0.18	0.18	0.03	-
Inconel 718	53.5	0.15	18.5	19	3.0	0.5	0.9	5.1	0.18	-	0.04	-
Inconel X-750	73	0.25	7	15.5	-	0.70	2.5	1	0.50	0.25	0.04	-
<i>Nikel-Demir-Krom</i>												
Inconel 800	31	0.38	46	20	-	0.38	0.38	-	0.75	0.50	0.05	-

Kaynak: Smith and Baker (2015). *,% Ağırlık, a: Min. b:Max. c:Denge.

Tablo 1. Nikel Esaslı Malzemelerin Kimyasal Bileşimi (Devamı)

<i>Alaşım</i>	<i>Ni</i> *	<i>Cu</i> *	<i>Fe</i> *	<i>Cr</i> *	<i>Mo</i> *	<i>Al</i> *	<i>Ti</i> *	<i>Nb</i> *	<i>Mn</i> *	<i>Si</i> *	<i>C</i> *	<i>Diğer</i> *
Inconel 800H	31	0.38	46	20	-	0.38	0.38	-	0.75	0.50	0.07	-
Inconel 825	42	1.75	30	22.5	3	0.10	0.90	-	0.50	0.25	0.01	-
Inconel 925	43.2	1.8	28	21	3	0.35	2.10	-	0.60	0.22	0.03	-
Pyromet 860	44	-	Kalan	13	6	1.0	3.0	-	0.25	0.10	0.05	4.0 Co
Refractaloy 26	38	-	Kalan	18	3.2	0.2	2.6	-	0.80	1.00	0.03	20 Co
<i>Nikel-Demir</i>												
Nilo 36	36	-	61.5	-	-	-	-	-	0.5	0.09	0.03	-
Nilo 42	41.6	-	57.4	-	-	-	-	-	0.5	0.06	0.03	-
Ni-Span-C 902	42.3	0.05	48.5	5.33	-	0.55	2.6	-	0.40	0.50	0.03	-
Incoloy 903	38	-	41.5	-	-	0.90	1.40	2.9	0.09	0.17	0.02	14 Co
Incoloy 907	37.6	0.10	41.9	-	-	1.50	-	4.70	0.05	0.08	0.02	14 Co
<i>Nikel-Krom-Molibden</i>												
Hastelloy X	Kalan ^c	-	19.5	22	9	-	-	-	-	-	0.01	-
Hastelloy G	Kalan	2	19	22	6.5	-	-	2.1	<1	1.5	<0.05	<1W, <2.5 Co
Hastelloy C-276	Kalan	-	5.5	15.5	16	-	-	-	<0.08	<1	<0.01	2.5 Co, 4 W, 0.35 V
Hastelloy C	Kalan	-	<3	16	15.5	-	<0.7	-	<0.08	<1	<0.01	<2 Co
Inconel 617	54	-	-	22	9	1	-	-	-	-	0.07	12.5 Co
Inconel 625	Kalan	-	2.5	21.5	9	<0.4	<0.4	3.6	-	-	0.03	-
MAR-M-252	Kalan	-	-	19	10	1	2.6	-	<0.5	<0.5	0.15	10 Co 0.005 B

Kaynak: Smith and Baker (2015). *,% Ağırlık, a: Min. b:Max. c:Denge.

Tablo 1. Nikel Esaslı Malzemelerin Kimyasal Bileşimi (Devamı)

<i>Alaşım</i>	<i>Ni</i> [*]	<i>Cu</i> [*]	<i>Fe</i> [*]	<i>Cr</i> [*]	<i>Mo</i> [*]	<i>Al</i> [*]	<i>Ti</i> [*]	<i>Nb</i> [*]	<i>Mn</i> [*]	<i>Si</i> [*]	<i>C</i> [*]	<i>Diğer</i> [*]
Rene' 41	Kalan	-	-	19	10	1.5	3.1	-	-	-	0.09	11 Co <0.01 B
Rene' 95	Kalan	-	-	14	3.5	3.5	2.5	3.5	-	-	0.15	8 Co 3.5 W 0.1B 0.05 Zr
Astroloy	Kalan	-	-	15	5.3	4.4	3.5	-	-	-	0.06	15 Co
Udimet 500	Kalan	-	<0.5	19	4	3.0	3.0	-	-	-	0.08	18 Co 0.007 B
Udimet 520	Kalan	-	-	19	6	2.0	3.0	-	-	-	0.05	12 Co 1W 0.005 B
Udimet 600	Kalan	-	<4	17	4	4.2	2.9	-	-	-	0.04	16 Co 0.02B
Udimet 700	Kalan	-	-	15	5.0	4.4	3.5	-	-	-	0.07	18.5 Co 0.025B
Udimet 1753	Kalan	-	9.5	16.3	1.6	1.9	3.2	-	0.1	0.05	0.24	7.2 Co 8.4W 0.008B 0.06 Zr
Waspaloy	Kalan	<0.1	<2	19	4.3	1.5	3	-	-	-	0.08	14 Co 0.006B 0.005 Zr
<i>Nikel-Toz Alaşımları (Dispersiyon ile sertleştirilmiş)</i>												
TD-Nikel	98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2ThO ₂
TD-NiCr	Kalan	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	1.7 ThO ₂
<i>Nikel-Toz Alaşımları (Mekanik alaşımlama)</i>												
Inconel MA 754	78	-	1.0	20	-	0.3	0.5	-	-	-	0.05	0.6Y ₂ O ₃
Inconel MA 6000	69	-	-	15	2	4.5	2.5	-	-	-	0.05	4W 2Ta 1.1 Y ₂ O ₃

Kaynak: Smith and Baker (2015).^{*}% Ağırlık, a: Min. b:Max. c:Denge.

Nikel-demir alaşımları

Nikel-demir bazlı alaşımlar düşük genleşme katsayıları ile bilinmektedir. Bu seri alaşımlar nilo 36 ile ün kazanmıştır. Karakteristik özellikler yarı iletken kuşun çerçeveler ve cam sızdırmazık ekipmanlarında tüketimlerini mümkün kılmıştır. Ayrıca bu kodlu malzeme uçak gövdelerinin imalatında sarf edilen kompozitlerin hazırlanmasında yararlanılan gereçlerde de tercih edilmektedir.

Hastelloy alaşımları

Bu alaşımlar yüksek korozyon dayanımı, kolay şekillendirilebilirlik ve iyi kaynak edilebilmelerine karşın mukavemetleri düşüktür. Hastelloy B, C, D, F, G, N, W ve X gibi serilerinden oluşan alaşım ailesi %44 - %85 arası nikel ihtiva etmektedir. Molibden, demir, krom, tungsten, silisyum ve bakır elementleri sırası ile çoktan aza doğru dizilir iken kobalt, niyobyum ve tantalı ise nispeten daha az miktarda içermektedir.

Süperalaşımlar

Süper alaşımlar yüksek sıcaklık mukavemetleri ve mükemmel korozyon dirençleri ile popülerdir. Bu karakteristiklerinden dolayı uçak motorlarında ve gaz türbünlerinde yaygın olarak sarf edilmektedir. Nikel alaşım ailesi iki temel fazdan müteşekkil olup katı çözelti, çökelti ve oksit dispersiyon yöntemleri vasıtası ile dayanımları artırılmaktadır. Katı çözelti tekniğinde alaşımlara alüminyum, titanyum veya niyobyum çok az oranlarda katılarak mukavetlendirme gerçekleştirmektedir. Çökelti metodunda ise alüminyum ve titanyum ilaveleri katı çözelti yöntemine göre daha yüksek oranlarda yapılmaktadır. Oksit dispersiyonda Y_2O_5 bileşimindeki oksit parçacıkları düşük miktarlarda dahil edilmektedir. Bu alaşım grubuna temel dayanım karaktersitikleri γ' (gama prime) fazı kazandırmaktadır. Küresel yapıda olan gama prime fazı matris ile uyumludur. Süperalaşımlara W, Re, Mo gibi refrakter elementler ilave edilerek yüksek sıcaklık dayanımları arttırılmaktadır. Bu alaşımların haricinde %90Ni ve %10Cr, %94Ni, %3Mn, %2Al ve %1Si, %36Ni ve %64Fe, %34Ni, %4.5Cr, %2W ve %59.5Fe elementlerinden oluşan sırası ile kromel, alümel, invar ve elinvar alaşımlarıda bulunmaktadır. Ayrıca para imalatında tüketilen türleride mevcuttur. Kromel ve alümel termokupl imalatında (1200°C'ye kadar), invar yüksek ısıl dayanım gerektiren uygulamalarda, elinvar ise saat yayı yapımında kullanılmaktadır. Para alaşımları, diğer taraftan, belli oranlarda nikel ve bakır ihtiva etmektedir. Bunların yanı sıra nikel gümüşü olarak adlandırılan %18Ni, %65Cu ve %17Zn içeren alaşım çeşidi de vardır. Bu alaşım gümüşümsü renkte olup 200 farklı türe sahiptir (Rosenberg 1968, Davis 1997, Nipera 1997, Cangul et al. 2002, Zhao et al. 2002, Smith and Baker 2015). Nikel alaşımlar haiz oldukları avantajlar nedeni ile pekçok farklı alanda yaygın kullanım sergilemektedir.

Tablo 2. Nikel Alaşımların Mekanik Karakteristikleri

Alaşım Türü	Akma Mukavemeti (ksi)^a	Çekme Dayanımı (ksi)^a	Süneklik (%)	Sertlik (Rockwell)
<i>Nikel</i>				
Nikel 200	21.5	67	47	55 Rb
Nikel 201	15	58.5	50	45 Rb
Permanickel 300	38	95	30	79 Rb
Duranickel 301	132	185	28	36 Rc
<i>Nikel-bakır</i>				
Monel 400	31	79	52	73 Rb
Monel 404	31	69	40	68 Rb
Monel R-405	56	91	35	86 Rb
Monel K-500	111	160	24	25 Rc
<i>Nikel-krom-demir</i>				
Inconel 600	50	112	41	90 Rb
Inconel 601	35	102	49	81 Rb
Inconel 690	53	106	41	97 Rb
Inconel 706	158	193	21	40 Rc
Inconel 718	168	205	20	46 Rc
Inconel X-750	102	174	25	33 Rc
<i>Nikel-demir-krom</i>				
Incoloy 800	48	88	43	84 Rb
Incoloy 800H	29	81	52	72 Rb
Incoloy 825	44	97	53	84 Rb
Incoloy 925	119	176	24	34 Rc
Pyromet 860	115	180	21	37 Rc
Refractaloy 26	100	170	18	-
<i>Nikel-demir</i>				
Nilo 42	37	72	43	80 Rb
Ni-Span-C 902	137	150	12	33 Rc
Incoloy 903	174	198	14	39 Rc
Incoloy 907	163	195	15	42 Rc

Kaynak: Smith and Baker (2015). ^aMPa=ksi x 6.895.

Tablo 2. Nikel Alaşımların Mekanik Karakteristikleri (Devamı)

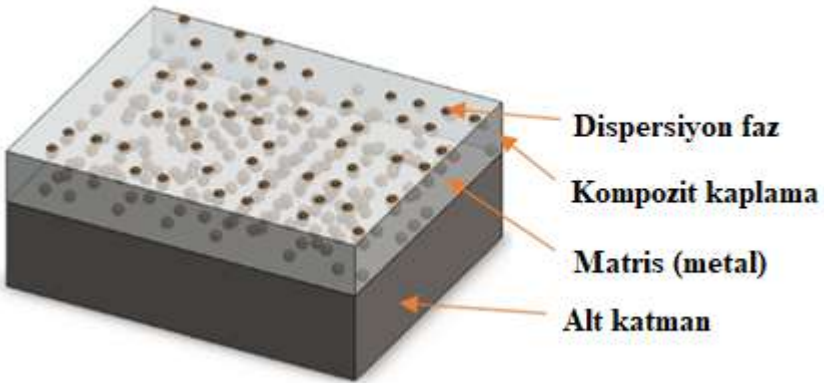
Alaşım Türü	Akma Mukavemeti (ksi) ^a	Çekme Dayanımı (ksi) ^a	Süneklik (%)	Sertlik (Rockwell)
Nikel-krom-molibden				
Hastelloy X	52	114	43	-
Hastelloy G	56	103	48.3	86 Rb
Hastelloy C-276	51	109	65	-
Inconel 617	43	107	70	81 Rb
Inconel 625	63	140	51	96 Rb
MAR-M-252	122	180	16	-
Rene' 41	120	160	18	-
Rene' 95	190	235	15	-
Astroloy	152	205	16	-
Udimet 500	122	190	32	-
Udimet 520	125	190	21	-
Udimet 600	132	190	13	-
Udimet 700	140	204	17	-
Udimet 1753	130	194	20	39 Rc
Waspaloy	115	185	25	-
Nikel-toz alaşımları (Dispersiyon ile sertleştirilmiş)				
TD-Nikel	45	65	15	-
TD-NiCr	89	137	20	-
Nikel-toz alaşımları (Mekanik Alaşımlama)				
Inconel MA 754	85	140	21	-
Inconel MA 6000	187	189	3.5	-

Kaynak: Smith and Baker (2015). ^aMPa=ksi x 6.895.

Ticari saflıktaki nikel üstün karakteristik özelliklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda genellikle alaşım elementi olarak sarf edilmektedir. Bu materyal paslanmaz çelik eldesinde, alaşım çeliği üretiminde, demir dışı metallerde, mıknatıs imalatında, metalik para yapımında ve özel amaçlı alaşımlarda tercih edilmektedir. Otomotiv, uçak ve gemi gibi kara, hava ve deniz ulaşım araçlarında korozyona karşı yüksek dayanım gerektiren parça tasarımında değerlendirilmektedir. Ayrıca yeni nesil taşıtlarda batarya ve parçası yapımında tüketilmektedir. Bunların yanı sıra diğer kullanımlarına kimya sanayi, petrol endüstrisi, elektrik ve elektronik aygıtlar ve mutfak gereçleri örnek verilebilir.

3. Nikel kompozitler

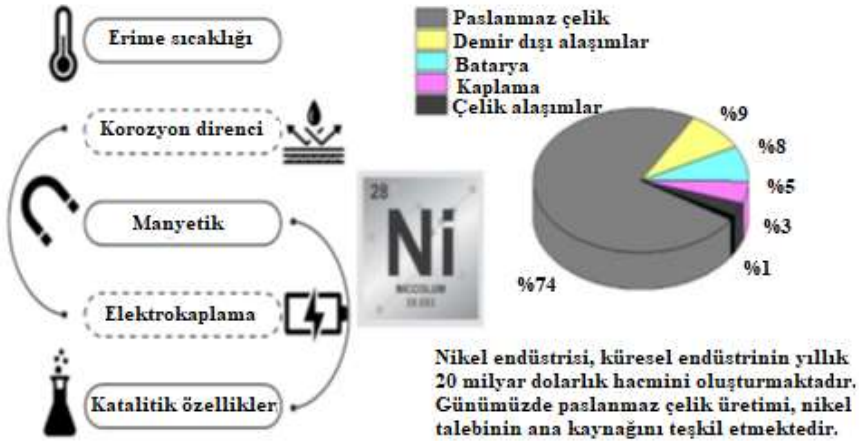
Yüksek mukavemet, mükemmel termal kararlılık, yüksek korozyon ve iyi aşınma direnci için nikel ve alaşımları bürür, karbür, oksit, nitrür, elmas, metal vb. farklı takviye materyalleri ile güçlendirilmektedir. Endüstriyel taleplere karşılık vermek amacı ile geliştirilen nikel matrisli kompozitlerde döküm, toz metalurjisi, eklemeli imalat gibi geleneksel ve yeni nesil üretim teknikleri kullanılmaktadır. Seramik esaslı elemanların sarfiyatında sertlik dayanım, aşınma ve termal stabilite gibi karakteristiklerde önemli iyileşme sağlanır iken metal kökenlilerde matris ve takviye arasında iyi bağ teşekülü elde edilerek şekillendirilebilirlikte kritik artışın hasıl olduğu saptanmıştır. Özellikle elektrokaplama, kimyasal kaplama, elektroforetik biriktirme, hidrotermal biriktrime, soğuk sprej, argon ark kaplama, termal sprej ve lazer kaplama gibi yüzey modifikasyon teknikleri vasıtası ile nikel bazlı kompozit kaplamalar kesici takımlar, türbin kanatları, silindir ve piston gibi parçaların tüketimini için geliştirilmektedir. Şekil 1'de nikel esaslı kompozit malzeme kaplama işlemi gösterilmektedir. Ayrıca üstün niteliklerinden dolayı takviye materyali olarakta oldukça sık tercih edilmektedir. Bilhassa yüksek sıcaklıklarda sergilediği mükemmel dayanımdan dolayı yararlanılmaktadır. Metal matrisli kompozitlerin kalıtsal yetersizliklerini iyileştirmede önemli rol oynamaktadır. Zira nikel esaslı veya nikel ile güçlendirilmiş kompozit malzemeler günümüz havacılık, otomotiv, biyomedikal ve enerji sektörlerinin gereksinim duyduğu malzeme karakteristiğine cevap verebilecek özelliktedir (Kumar et al. 2015, Kumar et al. 2016, Karmakar et al. 2021, Liu et al. 2019, Raghavendra at al. 2021, Wołowicz and Wawrzekiewicz 2021, Gupta and Chak 2023, Ratsoma et al. 2023, Sampath et al. 2023, Ahmed et al. 2025, Revie and Uhlig 2025).



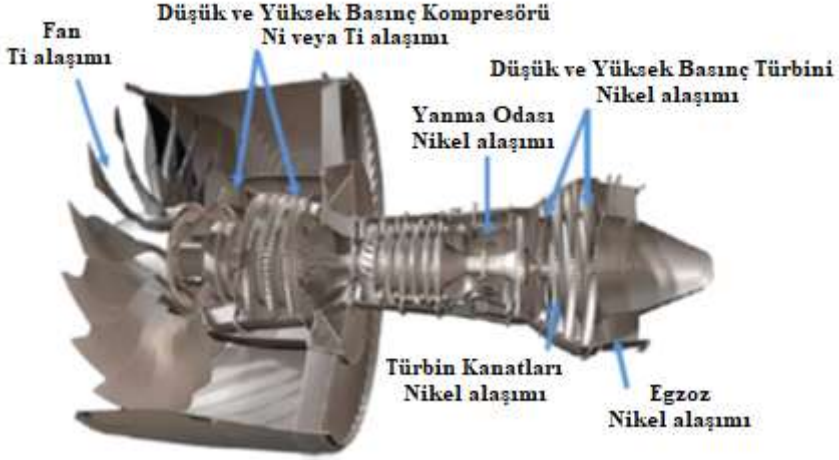
Şekil 1. Nikel bazlı kompozit malzeme kaplama (Abdessalam et al. 2025).

4. Nikel uygulamaları

Şekil 2'de nikel, alaşım ve kompozitlerinin genel özellikleri ve yaygın uygulama alanları gösterilmektedir. Nikel esaslı malzemeler yüksek erime sıcaklığı, mükemmel korozyon direnci, üstün manyetik, kaplama ve katalitik özelliklerden dolayı pek çok farklı sektörde yaygın olarak sarf edilmektedir. Paslanmaz çelik, demir dışı alaşımlar, batarya, kaplama ve çelik alaşım imalatı başlıca tüketim alanlarını oluşturmaktadır. Bunların yanı sıra çalışma koşullarında oldukça yüksek sıcaklıklara maruz kalan uçak motoru aksamalarında, çeşitli agresif akışkan ve açık atmosfer ile sürekli temas halindeki deniz araçlarında, yeni nesil olarak adlandırılan hibrit ve elektrikli taşıt akümülatörlerinde tercih edilmektedir. Küresel endüstrinin modern malzeme gereksiniminin ciddi bir kısmını karşılayacak potansiyele sahip nikel esaslı malzemeler sektörün yıllık maliyet hacminin azımsanamıyacak kritik bir bölümümü ihtiva etmektedir. Bu malzemeler, ayrıca, konvansiyonel ve günümüze ait yenilenebilir enerji santrallerinin güç eldesinde hayati rol oynayan temel bileşenlerinin yapımında ön plana çıkmaktadır. Diğer taraftan spesifik karakteristikleri ile çevresel faktörler, uzun ömür, yüksek performans gibi unsurlar göz önünde bulundurularak kimyasal reaktörler, ısı eşanjörleri ve boru hatlarında kullanılmaktadır. Dahası yüksek aşınma direnci, yüksek gerilme ve ısılara karşı mükemmel mukavemet gibi özellikleri fosil kökenli yakıtların rafinasyonu sırasında faydalanan sondaj ekipman ve araçlarının üretiminde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu malzemeler zorlu servis şartlarında hasar riskini en aza indirgeyerek endüstriyel takım ve donanımların güvenilirliğini maksimize etmektedir (Thompson 1958, Olson 2001, Decker 2006, Patel 2006, Benvenuto 2016, Bâk et al. 2023, Miracle 2025).



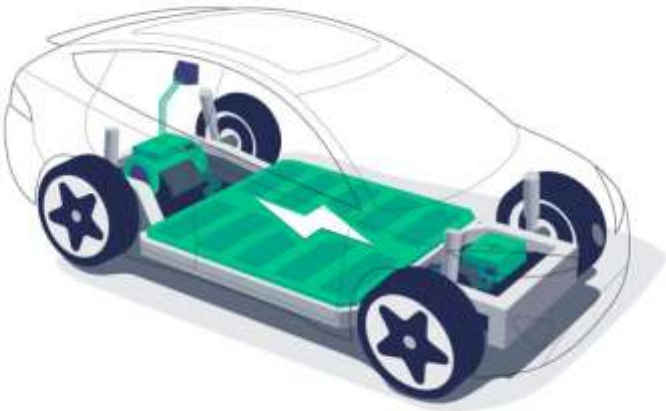
Şekil 2. Nikel alaşım ve kompozitlerinin genel özellikleri ve yaygın uygulama alanları (Bâk et al. 2023).



Şekil 3. Nikel esaslı malzemelerin uçak motoru yapımında kullanımı (Ulutan and Ozel 2011).

Fan, düşük ve yüksek basınç kompresörü, yanma odası, düşük ve yüksek basınç türbini, kanatlar ve egzoz sisteminden genel olarak oluşan uçak motorları çalışma sırasında yüksek gerilme, titreşim ve ısılara maruz kalmaktadır. Bu aksamaların imalatında çoğunlukla nikel ve titanyum esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Özellikle nikel, alaşım ve kompozitleri iyi spesifik niteliklerinden dolayı titanyuma kıyasla nispeten daha fazla tercih edilmektedir. Kompresör, türbin ve kanatları, yanma odası ve egzoz sistem ve bileşenlerinde oldukça fazla sarf edilmektedir. Şekil 3'te gösterilen bu aksamalardan kompresör hem yanma için gerekli olan hava miktarını temin etmekte hemde hava basıncını istenilen seviyeye yükseltmektedir. Böylece yanma verimi iyileştirilerek güç eldesi maksimum düzeye çıkartılmaktadır. Spesifik tasarıma sahip yanma odası ise yanma sonu açığa çıkan yüksek gaz sıcaklığına dayanabilecek nitelikte imal edilmektedir. Ayrıca titreşim ve vuruntulara karşı son derece dayanıklıdır. Motor verimi üzerinde hayati rol oynayan oda yanma ürünlerini türbine göndermektedir. Yüksek sıcaklıktaki gaz enerjisi türbin kanatları tarafından kinetik enerjiye dönüştürülerek diğer aksamaların tahrik edilmesinde sarf edilmektedir. Egzoz sistem ve bileşenleri yanma odası ve türbindekine benzer şekilde yüksek sıcaklığa uğramaktadır. Dolayısıyla sürekli olarak yüksek sıcaklık ve yükler altında çalışan bu parçalar nikel esaslı malzemelerden üretilerek servis gereksinimlerine cevap verilmektedir (Johnson 1937, Backman and Williams 1992, Mattingly 2002, Ulutan and Ozel 2011, Masiol and Harrison 2014, Okura 2015, Kumar and Padture 2018). Bu malzemeler havacılık endüstrisinde her ne kadar yüksek mukavemet, yüksek sıcaklıklarda mükemmel dayanım gibi karakteristikleri ile ön plana çıksa da korozyon dirençlerinin çok iyi olması önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Atmosfer kirliliği modern yaşamın önemli bir sorunu haline dönüşmüştür. Zira havadaki emisyonlar sera gazı etkisine yol açarak çevresel tahribatlara neden olmaktadır. Bu durum pek çok farklı parametreden kaynaklanır iken içten yanmalı motor egzozu zararlı bileşenleri temel etken olarak dikkat çekmektedir. Dolayısıyla toksit özellikteki bu salınımların tamamen veya kısmen ortadan kaldırılması oldukça önem arz etmektedir. Bu bağlamda geliştirilen hibrit ve elektrikli taşıtlar sürdürülebilir çevre açısından son derece hayatidir. Yeşil inovasyon olarak ifade edilen bu araçlarda batarya teknolojisi sürekli olarak iyileştirilmektedir. Zira gerek hibrit gerekse de elektrikli otomobillerde yüksek maliyet ve düşük menzil ciddi dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Bataryalardan kaynaklanan sakıncaları bertaraf etmek için lityum-iyon, lityum-demir-fosfat, nikel-metal-hidrit, nikel-kadmiyum, kurşun-asit, katı hal ve akış tip bataryalar geliştirilmiştir. Şekil 4'te verilen nikel esaslılar yüksek enerji ve güç yoğunlukları ile ön plana çıkmaktadır. Bunlar, ayrıca diğerlerine kıyasla yüksek güvenilirlik ve mükemmel dayanım sergilemektedir. Ancak nikel-kadmiyum esaslılar nispeten daha yüksek maliyete sahiptir. Buna karşın uzun ömürlü olup, deşarj sırasında hasara uğramamaktadır. Kadmiyum içeriklerinde gözlenen yüksek maliyet ve sürdürülebilir çevre açısından önemli problemlere neden olan düşük geri kazanım oranı kullanım miktarlarını kısıtlamaktadır. Bu sebeple araştırmalar nikel-metal-hidritler üzerine yoğunlaşmıştır. Nikel metal hidrit ve nikel kadmiyum haricinde, son derece düşük sarfiyata sahip nikel-çinko akümülatörlerde mevcuttur. Bunların kısa döngü ömürleri yaygınlıklarını sınırlamıştır (Dhar et al. 1997, Scrosati et al. 2015, Ogura and Kolhe 2017, Özcan et al. 2021, Gayathri and Padmanaban 2025).



Şekil 4. Yeni nesil otomobillerde nikel-metal-hidrit ve nikel-kadmiyum bataryalar (<https://canadianautodealer.ca>).

5. Sonuç

Geçiş metalleri arasında yer alan nikel yüksek termal iletkenlik, iyi sertlik, yüksek erime sıcaklığı ve mükemmel ısıl kararlılık gibi karakteristiklere sahiptir. Nikel esaslı malzemeler spesifik özellikleri ile pekçok endüstriyel alan için önemli bir potansiyel teşkil etse de temel sarfiyat sahaları uçak ve otomobil gibi ulaşım dallarıdır. Zira yüksek sıcaklık dayanımları ve iyi süneklikleri bu araçlar için tasarlanan kompleks gereksinimlere haiz parça ve aksamalarda tüketilebilecek yeterlidir. Özellikle ısı enerjisinin açığa çıktığı yanma odaları ve silindir blokları için büyük umut vadetmektedir. Bu bileşenler çalışma sırasında yüksek sıcaklık ve yüklere maruz kalmakta ve mekanik verime doğrudan tesir etmektedir. Ayrıca ömür, hasar, bakım ve onarım süreçleri maliyet açısından son derece kritiktir. Diğer taraftan egzoz sistemi yüksek ısılar altında görevini yapmaktadır. Dolayısıyla sadece hava taşıtlarında değil aynı zamanda içten yanmalı motorlarda da egzozdaki kullanımı önem arz etmektedir. Bu nedenle hem uçak hem de kara taşıtlarında sürekli olarak yüksek sıcaklıklarda çalışan parçalarda sarfiyatları giderek artırılmalıdır. Nikel, alaşım ve matrisli kompozitler bu niteliklerinin yanı sıra mükemmel korozyon dirençleri ile pöpülerdir. Lakin hammadde rezervlerinin verimli kullanımında kritik rol sergileyen korozyon etkenlere karşı yüksek dayanım ancak nikel, alaşım ve kompozit gibi materyaller ile mümkün olmaktadır. Bu malzeme grupları aksam ve parçaları agresif ortamlara karşı muhafaza ederek hem servis sürelerini hem de ömürlerini uzatmaktadır. Böylece doğal kaynakların israfı önemli ölçüde engellenmektedir. Dahası sıfır emisyon üretimi için oldukça hayati olan hibrit ve elektrikli araç bataryalarındaki kullanımları insan sağlığı ve solunabilir hava kalitesi bakımından aşırı derecede ehemmiyetlidir. Her ne kadar nikel-metal-hidrit tip bataryalar üzerinde yoğun çalışmalar olsa da bunların işlevselliği iyileştirilerek diğerlerine kıyasla daha cazip hale getirilmelidir. Böylece yeni nesil otomobillerde büyük dezavantaj teşkil eden yüksek maliyet ve kısa menzil sorunları nikel esaslı akümülatör teknolojisi ile oratadan kaldırılmalıdır. Dahası hidrojen depolamada faydalanılan intermetalik bileşiklerde de nikel içerikliler oldukça kritiktir. Bu ikincil fazlar hidrojenin enerji kaynağı olarak kullanıldığı içten yanmalı motorların yakıt pili hücrelerinde yüksek gravimetrik kapasiteleri ile dikkat çekmektedir. Bu hidritler çevresel faktörler açısından büyük öneme sahiptir. Zira nikel hidritler vasıtası ile fosil kökenli yakıtlara olan bağımlılık minimize edilerek atmosfere daha az oranlarda karbon, nitrojen ve sülfürlü bileşikler salınmaktadır. Sonuç olarak avantajları ile modern dünyanın spesifik malzeme ihtiyaçlarına cevap verebilecek karakterde olan nikel, alaşım ve kompozitlerinin tüm sektörel çevrelerde kullanım miktarı artırılmalıdır. Bilhassa uçak ve otomotiv gibi sürekli gelişen alanlarda uzun ömür, doğal hammadde, ekoloji, maliyet, güvenlik ve konfor gibi etkenler göz önünde bulundurularak tüketimleri teşvik edilmelidir.

Kaynakça

- Abdesselam, Y., Belloufi, A., Rezgui, I., Abdelkrim, M., Catalin, T., & Chiriță, B. (2025). Composite coatings based on nickel and Y2O3 nanoparticles: a comprehensive analysis of developments in electrodeposition and functional property optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-60.
- Ahmed, W. A., Mohamed, L. Z., Abolkassem, S. A., & El-Shazly, M. (2025). Nickel metal matrix composites: from synthesis to sustainable applications. *Chemical Papers*, 1-23.
- Backman, D. G., & Williams, J. C. (1992). Advanced materials for aircraft engine applications. *Science*, 255(5048), 1082-1087.
- Bąk, J., Sofińska-Chmiel, W., Gajewska, M., Malinowska, P., & Kołodyńska, D. (2023). Determination of the Ni (II) Ions Sorption Mechanism on Dowex PSR2 and Dowex PSR3 Ion Exchangers Based on Spectroscopic Studies. *Materials*, 16(2), 644.
- Barceloux, D. G., & Barceloux, D. (1999). Nickel. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 37(2), 239-258.
- Bassford, T. H., & Hosier, J. (2002). Nickel and its Alloys. *Handbook of Materials Selection*, 235-258.
- Benvenuto, M. A. (2016). *Metals and alloys: industrial applications*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Cangul, H., Broday, L., Salnikow, K., Sutherland, J., Peng, W., Zhang, Q., ... & Costa, M. (2002). Molecular mechanisms of nickel carcinogenesis. *Toxicology letters*, 127(1-3), 69-75.
- Cronstedt, A. F. (1751). *Svenska Vetenskaps Kong. Acad. Handl*, 12, 287.
- Davis, J. R. (Ed.). (2000). *Nickel, cobalt, and their alloys*. ASM international.
- Decker, R. F. (2006). The evolution of wrought age-hardenable superalloys. *Jom*, 58(9), 32-36.

- Dhar, S. K., Ovshinsky, S. R., Gifford, P. R., Corrigan, D. A., Fetcenko, M. A., & Venkatesan, S. (1997). Nickel/metal hydride technology for consumer and electric vehicle batteries—a review and up-date. *Journal of power sources*, 65(1-2), 1-7.
- Everhart, J. (Ed.). (2012). *Engineering properties of nickel and nickel alloys*. Springer Science & Business Media.
- Farrer, J. C. M. (2004). *The alloy tree: a guide to low-alloy steels, stainless steels, and nickel-base alloys*. CRC Press.
- Fraser, O. B. J. (1952). Developments in nickel. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44(5), 950-954.
- Fyfe, A. (1828). Analysis of tutenag, or the white copper of China. *Journal of the Franklin Institute*, 6(1), 16-17.
- Gayathri, M. N., & Padmanaban, S. (2025). *Electric Vehicles and Distributed Generation-Microgrid*. CRC Press.
- Gupta, S. N., & Chak, S. K. (2023). Grinding temperature and its consequences on induced residual stresses during grinding of nickel-based superalloys: a review. *Engineering Research Express*, 4(4), 042002.
- Habashi, F. (Ed.). (2008). *Alloys: preparation, properties, applications*. John Wiley & Sons.
- Hausinger, R. P. (2013). *Biochemistry of nickel* (Vol. 12). Springer Science & Business Media.
- Heubner, U. (2000). *Nickel alloys*. CRC press.
- <https://canadianautodealer.ca/>
- Howard-White, F. B. (2024). *Nickel: an historical review*. Routledge.
- Johnson, J. B. (1937). Aircraft-Engine Materials. *SAE Transactions*, 153-164.
- Karmakar, R., Maji, P., & Ghosh, S. K. (2021). A review on the nickel based metal matrix composite coating. *Metals and Materials International*, 27(7), 2134-2145.

Kumar, B. A., Ananthaprasad, M. G., & GopalaKrishna, K. (2016). A review on mechanical and tribological behaviors of nickel matrix composites. *Indian Journal of Science and Technology*, 9, 2.

Kumar, B. A., Ananthaprasad, M. G., & Krishna, K. G. (2015). A review on corrosion behavior of nickel matrix composites. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 5(10), 342-346.

Kumar, S., & Padture, N. P. (2018). Materials in the aircraft industry. In *Metallurgical design and industry: Prehistory to the space age* (pp. 271-346). Cham: Springer International Publishing.

Kunlong, C. (2024). Copper-Nickel Alloy. In *The ECPH Encyclopedia of Kutz, M. (Ed.). (2002). Handbook of materials selection. John Wiley & Sons.*

Lippold, J. C., Kiser, S. D., & DuPont, J. N. (2011). *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys.* John Wiley & Sons.

Liu, Y., Gao, C., Li, Q., & Pang, H. (2019). Nickel oxide/graphene composites: synthesis and applications. *Chemistry–A European Journal*, 25(9), 2141-2160.

Mankins, W. L., & Lamb, S. (1990). *Nickel and nickel alloys.*

Mattingly, J. D. (2002). *Aircraft engine design.* Aiaa.

Masiol, M., & Harrison, R. M. (2014). Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric environment*, 95, 409-455.

Mining and Metallurgy (pp. 399-400). Springer, Singapore.

Miracle, D. B. (2025). High-entropy alloys: A rich history and a challenge for the future: DB Miracle. *MRS Bulletin*, 1-12.

Mudd, G. M. (2007a). An analysis of historic production trends in Australian base metal mining. *Ore Geology Reviews*, 32(1-2), 227-261.

Mudd, G. M. (2007b). The sustainability of mining in Australia: key production trends and their environmental implications. Department of

Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute, Melbourne.

Mudd, G. M. (2009). Nickel sulfide versus laterite: the hard sustainability challenge remains. In Proceedings of the 48th Conference of Metallurgists (pp. 23-26).

Mudd, G. M. (2010). Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. *Ore Geology Reviews*, 38(1-2), 9-26.

Nickel, C. (2000). *ASM Specialty Handbook*. ASM International Materials Park, OH, 22, 44073-0002.

Nipera., 1997. Internal draft document to URS Corporation. Included in URS

Ogura, K., & Kolhe, M. L. (2017). Battery technologies for electric vehicles. In *Electric Vehicles: Prospects and Challenges* (pp. 139-167). Elsevier.

Okura, T. (2015). Materials for aircraft engines. *ASEN*, 5063(2015), 1-14.

Olson, G. B. (2001). Beyond discovery: design for a new material world. *Calphad*, 25(2), 175-190.

Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M., & Özgüven, Ö. (2021). Elektrikli araçlarda kullanılan pil kimyasallarının özellikleri ve üstün yönlerinin kıyaslanması üzerine bir derleme çalışması. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(2), 276-298.

Patel, S. J. (2006). A century of discoveries, inventors, and new nickel alloys. *Jom*, 58(9), 18-20.

Raghavendra, C. R., Basavarajappa, S., Sogalad, I., & Kumar, S. (2021). A review on Ni based nano composite coatings. *Materials Today: Proceedings*, 39, 6-16.

Ratsoma, M. S., Poho, B. L., Makgopa, K., Raju, K., Modibane, K. D., Jafta, C. J., & Oyedotun, K. O. (2023). Application of nickel foam in electrochemical systems: a review.

Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2025). Corrosion and corrosion control. John Wiley & Sons.

Rosenberg, S. J. (1968). Nickel and its alloys (Vol. 106). US Department of Commerce, National Bureau of Standards.

Sampath, S., Ravi, V. P., & Sundararajan, S. (2023). An overview on synthesis, processing and applications of nickel aluminides: From fundamentals to current prospects. *Crystals*, 13(3), 435.

Scrosati, B., Garche, J., & Tillmetz, W. (Eds.). (2015). Advances in battery technologies for electric vehicles. Woodhead Publishing.

Sigel, A., Sigel, H., & Sigel, R. K. (Eds.). (2007). Nickel and Its Surprising Impact in Nature, Volume 2 (Vol. 2). John Wiley & Sons.

Smith, R. J., Lewi, G. J., & Yates, D. H. (2001). Development and application of nickel alloys in aerospace engineering. *Aircraft engineering and aerospace technology*, 73(2), 138-147.

Smith, G. D., & Baker, B. A. (2015). Nickel and its alloys. *Mechanical Engineers' Handbook, Volume 1: Materials and Engineering Mechanics*, 1, 267.

Thomason, E. (1845). Sir Edward Thomason's Memoirs During Half a Century.. (Vol. 2). Longman, Brown, Green, and Longmans.

Thompson, J. G. (1958). Nickel and its Alloys (Vol. 592). US Department of Commerce, National Bureau of Standards.

Ulutun, D., & Ozel, T. (2011). Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(3), 250-280.

Zhao, Q., Liu, Y., Müller-Steinhagen, H., & Liu, G. (2002). Graded Ni–P–PTFE coatings and their potential applications. *Surface and Coatings Technology*, 155(2-3), 279-284.

Wołowicz, A., & Wawrzkievicz, M. (2021). Screening of ion exchange resins for hazardous Ni (II) removal from aqueous solutions: Kinetic and equilibrium batch adsorption method. *Processes*, 9(2), 285.

BÖLÜM 15

RACING DRONE PERVANELERİNDE HİPOTETİK ÇELİK MALZEME KULLANIMININ AERODİNAMİK ETKİLERİNİN SST k- ω MODELİ İLE CFD ANALİZİ

MEHMET AKİF KARTAL¹

Giriş

İnsansız hava araçları (İHA'lar), son yıllarda savunma, tarım ve gözetim gibi alanlarda hızla yaygınlaşan teknolojiler arasında yer almaktadır [1-5]. Bu araçların tasarımında, pervane sistemleri kritik bir rol oynar çünkü itki gücü ve enerji verimliliği doğrudan pervane malzemesi ve şekline bağlı olmaktadır. Özellikle çelik pervaneler, dayanıklılıkları nedeniyle zorlu koşullarda tercih edilebilmektedirler; ancak ağırlıkları ve akış etkileşimleri nedeniyle aerodinamik analizler kaçınılmaz hale gelebilmektedir. Bu çalışmada, çelik pervaneli bir İHA'nın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemiyle analizi gerçekleştirilmiştir [6-10]. Odak noktası, SST k- ω türbülans modeli olmakta – bu model, duvar yakınındaki akışları ve serbest akım bölgelerini etkili bir şekilde birleştirerek gerçekçi sonuçlar üretebilmektedir.

Çelik pervanelerin avantajları arasında yüksek mukavemet ve uzun ömür öne çıksa da alüminyum veya kompozit alternatiflere kıyasla daha fazla türbülans yaratma eğiliminde olabilmektedirler [11]. Bu

¹ Dr. Öğretim Görevlisi, Bandırma Onyedİ Eylül Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, 10200 Bandırma, Balıkesir/Türkiye, ORCID: 0000-0002-9156-8907

durum, İHA'nın uçuş stabilitesini etkileyebilmektedir. CFD analizleri, fiziksel prototipler üretmeden önce bu sorunların öngörülmesine yardımcı olmaktadır [12]. Burada, İHA modeli üzerinden SST k- ω türbülans modelinin analizi yapılarak basınç, hız ve türbülans kinetik enerji ile alakalı analiz sonuçlarına değinilecektir.

Teorik Temeller

CFD, akışkan hareketlerini matematiksel denklemlerle simüle eden bir yöntem olarak kabul görmektedir. Temelinde Navier-Stokes denklemleri yatar; bunlar momentum, kütle ve enerji korunumunu ifade etmektedir. Ancak gerçek akışlarda türbülans faktörü devreye girmektedir. Türbülans, akışın düzensiz ve kaotik davranışını tanımlamakta ve doğrudan simüle etmek hesaplama açısından pahalı olabilmektedir. Bu yüzden, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) yaklaşımları gibi modeller kullanılabilmektedir [13-14].

SST k- ω modeli, standart k- ω ve k- ε modellerinin bir melezi olarak geliştirilmiştir. Burada k, türbülans kinetik enerjisini; ω ise türbülansın dağılım oranını temsil etmektedir. SST (Shear Stress Transport) özelliği, duvar bölgelerinde k- ω 'nun hassasiyetini korurken, serbest akımlarda k- ε 'nin sağlamlığını eklemektedir. Bu, pervane gibi dönen parçalarda özellikle faydalıdır çünkü basınç gradyanları ve ayrılma akışlarını doğru yakalayabilmektedir. Modelin denklemleri şu şekilde özetlenebilmektedir [15]:

- Türbülans kinetik enerjisi (k): $\partial(\rho k)/\partial t + \partial(\rho u_j k)/\partial x_j = P_k - \beta^* \rho k \omega + \partial/\partial x_j [(\mu + \sigma_k \mu_t) \partial k/\partial x_j]$
- Dağılım oranı (ω): $\partial(\rho \omega)/\partial t + \partial(\rho u_j \omega)/\partial x_j = (\gamma/v_t) P_k - \beta \rho \omega^2 + \partial/\partial x_j [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \partial \omega/\partial x_j] + 2(1 - F_1) \sigma_\omega \omega^2 (1/\omega) \partial k/\partial x_j \partial \omega/\partial x_j$

Bu denklemlerde, karıştırma fonksiyonu F1, duvar yakınlığını belirlemekte ve modelin geçişini sağlamaktadır. Çelik pervanelerde,

malzemenin sertliği akış ayrılmasını artırabileceğinden, SST'nin bu hassasiyeti kritik öneme sahip olmaktadır [16].

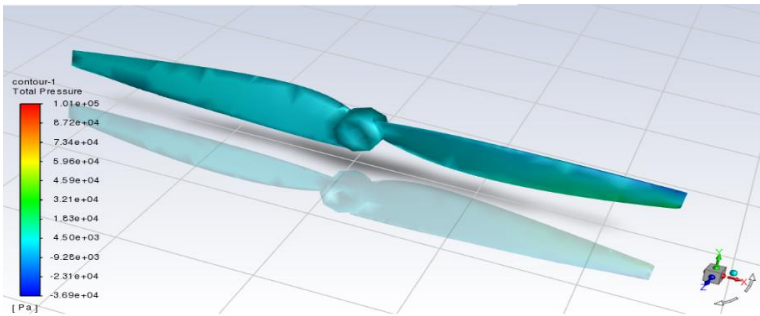
Analiz Yöntemi

Çelik pervaneli İHA'nın CFD analizi için öncelikle geometri modellenmektedir. Bu analizde çelikten yapılmış ve k- ω türbülans modeli kullanılarak analizler dört farklı rpm hızlarında (15000rpm, 20000rpm, 25000rpm ve 30000rpm) racing drone propeller modeli için gerçekleştirilmiştir. Adım adım süreç şöyle gerçekleştirilmiştir:

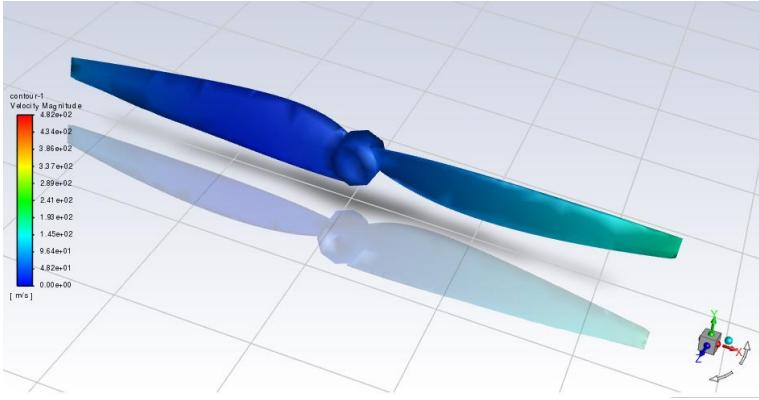
Geometri ve Ağ Oluşturma; Pervane, çelik malzeme özellikleri (yoğunluk: 7850 kg/m³, ısıl iletkenlik: 50 W/m·K) dikkate alınarak tasarlanır. Akış alanı, pervane etrafında silindirik bir hacim olarak tanımlanır. Ardından mesh atılarak solution kısmına geçilir. Gerekli sınır koşullar girildikten sonra çözümleme yapılmaktadır. Pervane dönüş hızı RPM cinsinden ayarlanır. Duvarlar için no-slip koşulu, çıkış için basınç outlet uygulanır. Akışkan hava için (yoğunluk: 1.225 kg/m³, viskozite: 1.789e-5 Pa·s) olmaktadır. Bu setup, çelik pervanenin yarattığı vorteksleri ve basınç dağılımlarını ortaya çıkarır. Örneğın, pervane kanatlarının ucunda oluşan tip vorteksleri, model sayesinde netleştirilebilmektedir.

Sonuçlar ve Tartışma

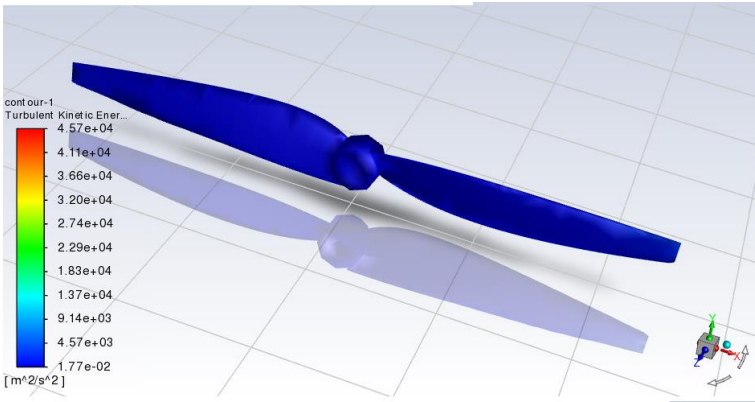
Yapılan analizler neticesinde alınan basınç, hız ve türbülans kinetik enerji contour dağılım sonuçları Şekil 1-12 arasında verilmektedir.



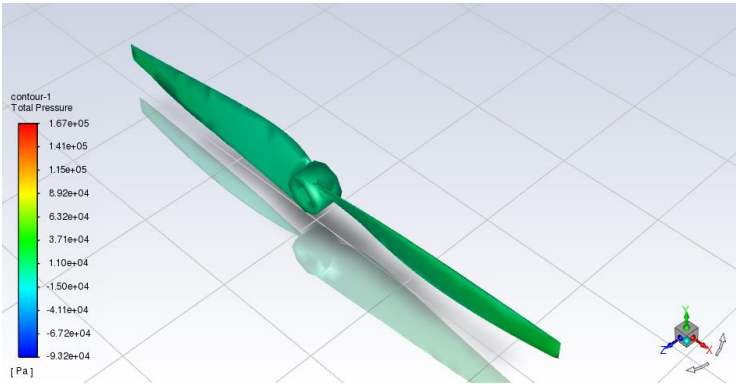
Şekil 1. 15000rpm'deki basınç kontürleri dağılımı



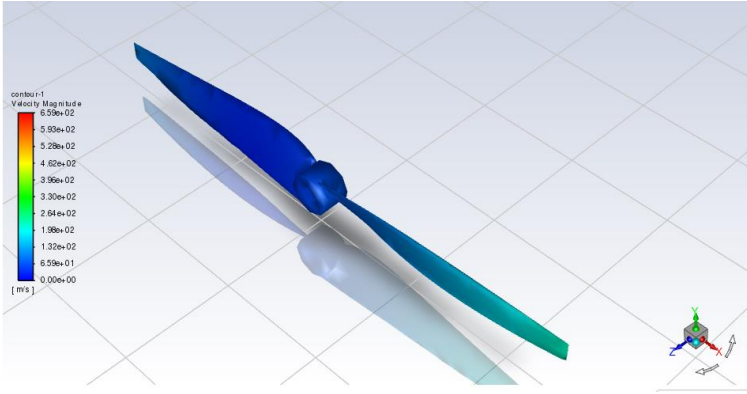
Şekil 2. 15000rpm'deki hız kontürleri dağılımı



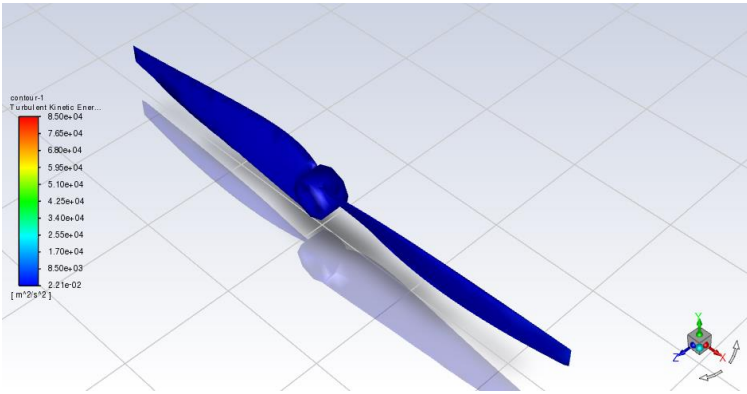
Şekil 3. 15000rpm'deki türbülans kinetik enerji kontürleri dağılımı



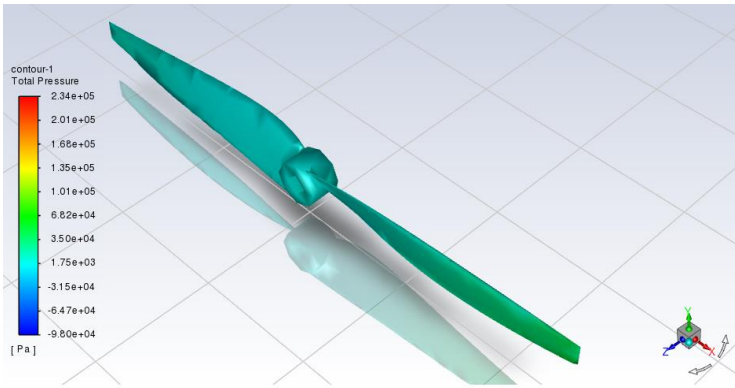
Şekil 4. 20000rpm'deki basınç kontürleri dağılımı



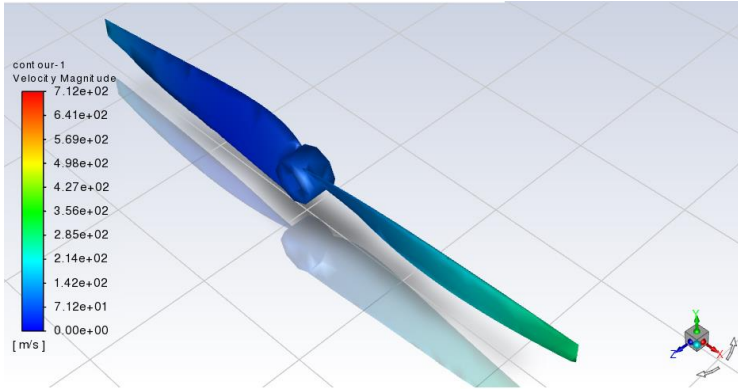
Şekil 5. 20000rpm'deki hız kontürleri dağılımı



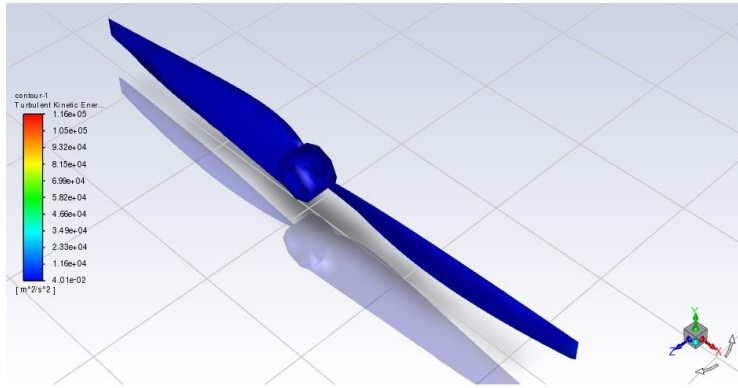
Şekil 6. 20000rpm'deki türbülans kinetik enerji kontürleri dağılımı



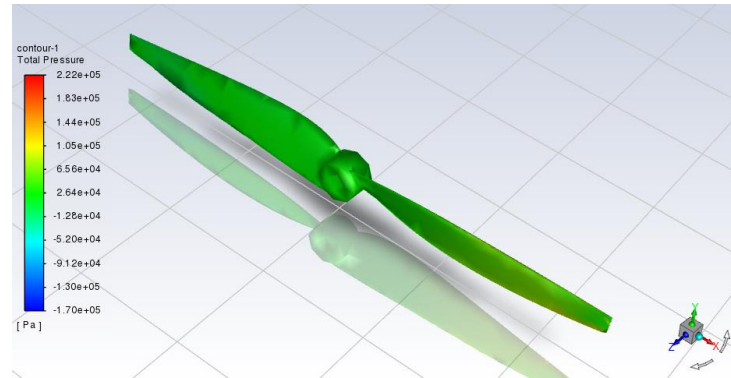
Şekil 7. 25000rpm'deki basınç kontürleri dağılımı



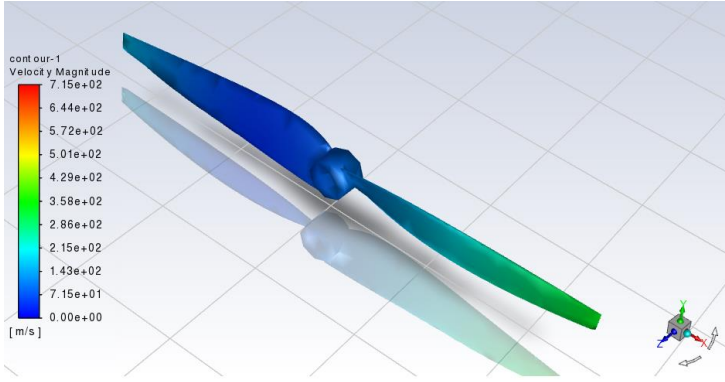
Şekil 8. 25000rpm'deki hız kontürleri dağılımı



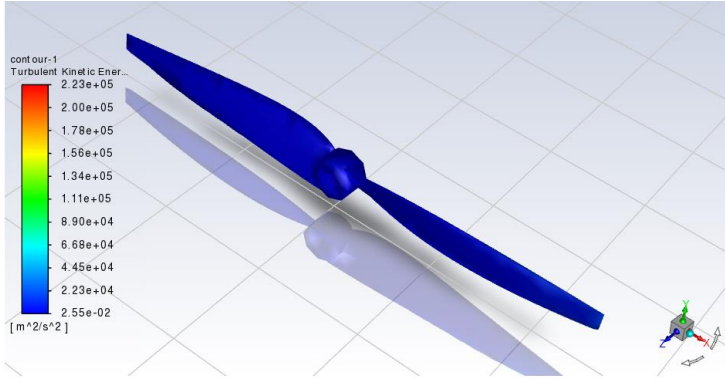
Şekil 9. 25000rpm'deki türbülans kinetik enerji kontürleri dağılımı



Şekil 10. 30000rpm'deki basınç kontürleri dağılımı



Şekil 11. 30000rpm'deki hız kontürleri dağılımı



Şekil 12. 30000rpm'deki türbülans kinetik enerji kontürleri dağılımı

Çelik pervaneli insansız hava aracının SST k- ω türbülans modeli kullanılarak yapılan CFD analizi, pervanenin farklı dönüş hızlarında aerodinamik davranışını incelemektedir. Düşük hızlarda basınç farkı sınırlı, akış büyük ölçüde yapışık ve türbülans kinetik enerji seviyesi düşük olduğundan üretilen itki kuvveti yetersiz kalmakta, ancak verim potansiyeli yüksek olmaktadır. Orta hız aralığında üst yüzeyde düşük basınç bölgesi genişlemekte, uç hızları belirgin artmakta ve türbülans hala kontrollü seyretmektedir; bu bölge, basınç farkının optimum düzeyde olması ve ayrılmanın gözlenmemesi nedeniyle en yüksek verimliliğe sahip çalışma aralığı olarak öne çıkmaktadır.

Yüksek hızlarda ise üst yüzeyde çok düşük basınç bölgeleri oluşmakta, pervane uçlarında hız ve türbülans kinetik enerji yoğun bir şekilde yükselmekte, bu da maksimum itki kuvveti üretirken tip vortexlerin güçlenmesiyle induced drag, gürültü ve enerji kaybını artırmaktadır. Genel olarak pervane tasarımı başarılıdır; akış ayrılması gözlenmemiş, çelik malzemenin sağladığı rijitlik sayesinde yüksek RPM'lerde bile yapışık akış korunmuştur. SST k- ω modeli, root ve uç bölgelerindeki advers basınç gradyanlarını doğru tahmin ettiği için uygun bir seçimdir. Optimum performans batarya ömrü, vibrasyon ve verim açısından 25000 RPM civarında elde edilirken, maksimum itki için 30000 RPM tercih edilebilmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmada gerçekleştirilen CFD analizleri, çelik pervaneli insansız hava aracının farklı dönüş hızlarındaki aerodinamik davranışını ayrıntılı bir şekilde ortaya koymuştur. Düşük devirlerde itki kuvveti sınırlı kalsa da akışın pervane yüzeyine büyük ölçüde yapışık kalması ve türbülansın düşük seviyelerde seyretmesi, tasarımın temel aerodinamik prensiplere uygun olduğunu göstermektedir. Orta devir aralığında ise itki üretiminin belirgin şekilde artması, basınç farkının optimum seviyeye ulaşması ve enerji kayıplarının henüz kritik düzeye çıkmaması, pervanenin en etkin çalıştığı bölgeyi işaret etmektedir. Yüksek devirlerde elde edilen maksimum itki, uç bölgelerde yoğunlaşan türbülans ve vorteks oluşumlarıyla birlikte gürültü ile verim kaybını da beraberinde getirmektedir. Tüm devirlerde gözlenen yapışık akış karakteristiği, çelik malzemenin sağladığı yapısal dayanım sayesinde pervanenin zorlu koşullarda bile stabil performans sergileyebileceğini kanıtlayabilmektedir. Çeliğin rijitlik avantajı vardır ama ağırlık yüzünden thrust-to-weight ratio düşebilmekte, batarya ömrü kısalabilmekte ve dolayısıyla kompozitler daha üstün kalabilmektedirler.

Genel değ erlendirildiğinde, analizler  elik pervane tasarımı ının başarılı bir aerodinamik profile sahip olduğunu ve farklı uçuş rejimlerine uyum sağlayabildiğini ortaya koyabilmektedir. Özellikle batarya t eketimi, titreşim ve gürültü gibi pratik kısıtlar dikkate alındığında, en uygun çalışma noktasının orta devir bandında yer aldığı söylenebilmektedir. Maksimum performans gerektiren durumlarda yüksek devirlerin kullanılabileceği ancak bu tercihlerin sistem ömrü üzerindeki olumsuz etkilerinin göz önünde bulundurulması gerektiği anlaşılabilmektedir. Elde edilen bulgular, gelecekteki pervane optimizasyon çalışmalarına değ erli bir temel oluşturacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Orozco, C., V squez, S., Caratt, J., De Armas, N., & Guar n, A. (2025). CFD-based study of aerodynamic performance in UAVs under adverse pressure gradient conditions. *Procedia Computer Science*, 257, 1213–1220. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.03.162>
- [2] D. Mourtzis, J. Angelopoulos, and N. Panopoulos, “Unmanned Aerial Vehicle (UAV) manipulation assisted by Augmented Reality (AR): The case of a drone,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 10, pp. 983–988, 2022, doi: [10.1016/j.ifacol.2022.09.483](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.483).
- [3] F. Nex *et al.*, “UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 184, pp. 215–242, Feb. 2022, doi: [10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006).
- [4] J. del Cerro, C. Cruz Ulloa, A. Barrientos, and J. de León Rivas, “Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Survey,” *Agronomy*, vol. 11, no. 2, p. 203, Jan. 2021, doi: [10.3390/agronomy11020203](https://doi.org/10.3390/agronomy11020203).
- [5] M. H. K. Martins *et al.*, “Comparative Analysis of Tandem Wing Tube-Launched UAV Aerodynamics: Computational Fluid

Dynamics (CFD),” in *2024 4th International Conference on Digital Futures and Transformative Technologies (ICoDT2)*, IEEE, Oct. 2024, pp. 1–8. doi: [10.1109/ICoDT262145.2024.10740235](https://doi.org/10.1109/ICoDT262145.2024.10740235).

[6] N. H. Rosid, E. Irsyad Lukman, M. Ahmad Fadlillah, and M. Agoes Moelyadi, “Aerodynamic characteristics of tube-launched tandem wing unmanned aerial vehicle,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1005, p. 012015, 2018.

[7] T. Kaya and S. Ozgen, “Aerodynamic design and control of tandem wing UAV,” in *AIAA Aviation 2019 Forum*, 2019.

[8] L. Gao, C. Li, H. Jin, Y. Zhu, J. Zhao, and H. Cai, “Aerodynamic characteristics of a novel catapult launched morphing tandem-wing unmanned aerial vehicle,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 2, p. 168781401769229, 2017.

[9] E. Cetinsoy, C. Hancer, K. T. Oner, E. Sirimoglu, and M. Unel, “Aerodynamic design and characterization of a quad tilt-wing UAV via wind tunnel tests,” *J. Aerosp. Eng.*, vol. 25, no. 4, pp. 574–587, 2012.

[10] Kartal, M. A., & Feyzioğlu, A. (2025). Aerodynamic performance and energy modeling of a quadcopter drone at different RPM: An experimental and CFD investigation of future design UAV. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaf132>

[11] Anderson, J. D. (2019). *Fundamentals of aerodynamics* (6th ed.). McGraw-Hill Education.

[12] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2nd ed.). Pearson Education.

[13] Ferziger, J. H., & Perić, M. (2012). *Computational methods for fluid dynamics* (4th ed.). Springer.

- [14] Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence modeling for CFD* (3rd ed.). DCW Industries.
- [15] Menter, F. R., Kuntz, M., & Langtry, R. (2003). Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 4, 625-632.
- [16] Langtry, R. B., & Menter, F. R. (2009). Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes. *AIAA Journal*, 47(12), 2894-2906. <https://doi.org/10.2514/1.42362>

BÖLÜM 16

RACING DRONE PERVANELERİNDE ÇELİK MALZEMENİN AERODİNAMİK PERFORMANSA ETKİSİNİN CFD İLE İNCELENMESİ: k-ε REALİZABLE MODELİ KULLANILARAK BİR HİPOTETİK ANALİZ

MEHMET AKİF KARTAL¹

Giriş

İnsansız hava araçları (İHA) son yirmi yılda adeta bir devrim yaşadı. Eskiden yalnızca askeri gözlem platformlarıyken bugün tarım ilacı sıkırmaktan kargo taşımacılığına, arama-kurtarmadan sinema çekimlerine kadar her alanda karşımıza çıkmaktadırlar. Bu kadar geniş bir kullanım yelpazesi, tasarımcıları sürekli daha hafif, daha dayanıklı ve daha verimli sistemler geliştirmeye zorlamaktadır. Bu sistemlerin kalbi ise hiç şüphesiz pervanelerdir (propeller) [1]. Pervane, motorun ürettiği gücü havaya aktaran ve aracı gökyüzünde tutan tek elemandır. Dolayısıyla pervanenin malzemesi, geometrisi ve üretim yöntemi aracın performansını, menzilini, gürültü seviyesini, hatta ömrünü doğrudan belirleyebilmektedir. Bu

¹ Dr. Öğretim Görevlisi, Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, 10200 Bandırma, Balıkesir/Türkiye, ORCID: 0000-0002-9156-8907

çalışmada, racing drone pervanelerinde geleneksel olarak tercih edilmeyen çelik malzemenin kullanımı hipotetik olarak ele alınmıştır. Amaç, çeliğin yüksek rijitlik ve dayanım avantajlarının yüksek RPM koşullarında aerodinamik performansla nasıl yansıtılacağını araştırmak ve bu malzemenin neden pratikte tercih edilmediğini sayısal olarak göstermektir.

Bir pervane seçerken ilk akla gelen soru genellikle “Ne kadar itiş gücü üretir?” olmaktadır. Oysa malzeme seçimi bu sorunun çok ötesine gidebilmektedir. Aynı geometriye sahip iki pervane, sadece malzeme farkından dolayı %15-20 daha farklı verim gösterebilmektedir. Üstelik bu fark sadece laboratuvar kağıtlarında kalmıyor; gerçek uçuşta pil ömrüne, taşıyabileceği faydalı yüke ve hatta titreşim kaynaklı yapısal yorulmaya da yansımaktadır.

Geleneksel Malzemeler ve Sınırları

Küçük İHA’larda uzun yıllar karbon fiber takviyeli epoksi kompozit ve enjeksiyon plastik (ABS, naylon, PETG) hakim olmuştur. Karbon fiberin yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve mükemmel yorulma dayanımı sayesinde 250 mm-550 mm çapındaki pervaneler genellikle bu malzemeden üretilmektedir. Ancak karbon fiberin iki büyük dezavantajı olabilmektedir: maliyeti ve üretim esnekliğinin sınırlı olmasıdır. Katman katman üretildiği için ince duvarlı, değişken hatveli tasarımlar yapmak zor ve pahalı olabilmektedir [2-3].

Plastik pervaneler ise tam tersi: çok ucuz, çok hızlı üretilabiliyor ama 10.000-15.000 devir/dakika civarında merkezkaç kuvvetine dayanma noktasında başarısız olabilmektedir. Birçok hobby pilotunun “pervane patladı, motor yere çakıldı” hikâyesi de tam da bu yüzden gerçekleşebilmektedir. Pervane malzemesi olarak çelik malzeme ve bakır malzemeden de yapılan modeller geliştirilebilmektedir. Geleneksel plastik ve kompozit pervanelerin yanı sıra, çelik malzeme de teorik olarak değerlendirilebilir. Çelik

(yoğunluk $\approx 7850 \text{ kg/m}^3$, Young modülü $\approx 200 \text{ GPa}$), aşırı rijitlik ve yüksek merkezkaç kuvvetlerine dayanım sağlar. Bu hipotetik senaryo, malzemenin aerodinamik etkilerini (deformasyon olmaması, yüzey pürüzlülüğü, vb.) ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu analizde çelikten yapılmış ve k-epsilon realizable scalable wall function türbülans modeli kullanılarak analizler dört farklı rpm hızlarında (15000rpm, 20000rpm, 25000rpm ve 30000rpm) racing drone propeller modeli için gerçekleştirilmiştir.

Yeni Nesil Malzemeler

Son beş yıldır özellikle iki malzeme grubu dikkat çekmektedir [4-5-6, 11]:

1. Karbon fiber + poliamid (nylon) hibrit kompozitler
2. Uzun karbon fiber takviyeli polipropilen (PP-CF) ve poliiftalamit (PA-CF) türleri

Bu malzemeler 3D yazıcılarla doğrudan üretilmekte, iç yapılarında kafes (lattice) veya gyroide dolgular kullanılarak hem ağırlık düşürülüyor hem de rijitlik arttırılmaktadır. Aynı geometriye sahip klasik karbon-epoksi pervane ile %30 uzun karbon fiber içeren PA-CF pervane arasında verim artışı ve daha az titreşim veren sonuçlara ulaşılabilmektedir [14]. Dolayısıyla, bir pervane için daha fazla kaldırabilme kapasitesi olduğu sonucuna varılabilmektedir.

Malzemenin Aerodinamik Performansa Etkisi

Malzeme seçimi sadece statik mukavemetle bitmiyor; pervane yüzey kalitesi ve esneklik aerodinamik karakteristiği de değiştirmektedir. Örneğin:

- Plastik pervaneler yüksek devirde blade twist (kanat bükülmesi) yaşayabilmekte ve bu da atak açısını düşürüp verimi azaltabilmektedir.

- Karbon fiber çok rijit olduğu için tasarlanan geometriyi koruyor ama yüzey pürüzlülüğü (lay-up kaynaklı) türbülansı artırabilmektedir [7].
- Yeni nesil PA-CF malzemeler ise orta seviyede esneklik sunuyor; pervane uçları hafifçe açılarak yüksek devirde otomatik olarak daha uygun atak açısı sağlamaktadır. Bu özellik “adaptif pitch” etkisi yaratmakta ve %4-7 ek verim getirebilmektedir [8-9]. Ayrıca pervane yüzeyine uygulanan microfiber veya porous kaplamalar broadband gürültüyü 1-2 dBA azaltmakta, laminar separation bubble kaynaklı hump’ı baskılamakta ve 10 µm altı pürüzlülük hedefini pratikte karşılamaktadır [15].

CFD Analiziyle Malzeme Etkisinin Modellenmesi

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (CFD) bugün pervane tasarımının vazgeçilmezleri arasındadır. ANSYS Fluent, OpenFOAM veya Siemens Star-CCM+ gibi yazılımlarla pervane çevresindeki hava akışı santimetrekare hassasiyetinde modellenmektedir. Ancak klasik CFD analizlerinde malzeme genellikle “rijit” kabul edilmektedir. Gerçek hayatta pervane esniyor, bu esneme ise basınç dağılımını ve dolayısıyla itiş değiştirilmektedir.

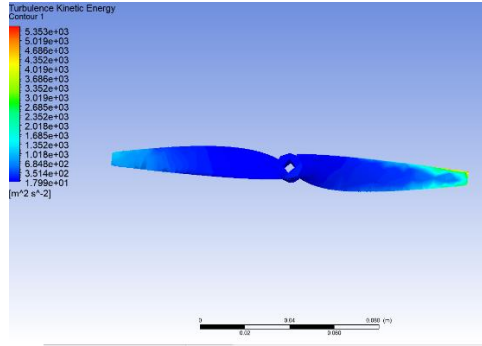
Bu etkileşimi yakalamak için iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır [12]:

a) FSI (Fluid-Structure Interaction) – Akışkan-Yapı Etkileşimi
Fluent’in System Coupling modülü ile pervane üzerine gelen aerodinamik yükler ANSYS Mechanical’e aktarılıyor, malzemenin Young modülü ve Poisson oranı girilerek deformasyon hesaplanabilmektedir. Elde edilen yeni geometri tekrar Fluent’e gönderilip akış yeniden çözülmektedir. Bu iterasyon genellikle 4-6 turda yakınsayabilmektedir.

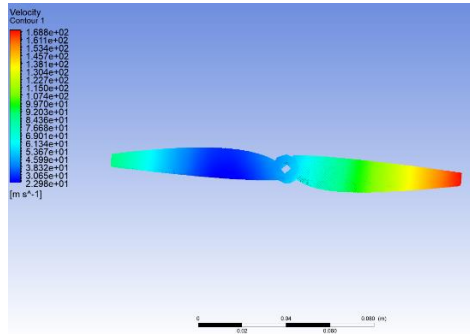
b) Tek yönlü eşleşme (One-way FSI) Daha hızlı sonuç almak için sadece aerodinamik yükler hesaplanıp yapı analizi ayrı yapılmaktadır. Küçük İHA'lar için genellikle yeterli olmakta çünkü deformasyon milimetrenin altında kalmaktadır [10].

· PA-CF veya naylon-karbon hibrit ($E \approx 25\text{--}40$ GPa): uç deformasyonu 2,5–4,5 mm, itiş %4–7 daha yüksek (esneklik sayesinde adaptif pitch etkisi oluşmakta ve verim artışı sağlanabilmektedir.) [12-13].

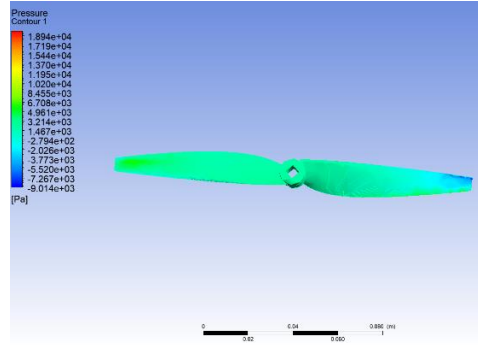
15000rpm'de şekil 1'de Turbulence Kinetic Energy, Şekil 2'de Velocity ve Şekil 3'te de Pressure contour dağılımı analiz sonuçları aşağıda verilmiştir:



Şekil 1. Turbulence Kinetic Energy analiz sonuçları

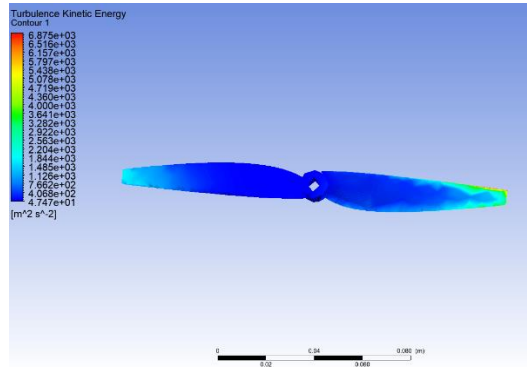


Şekil 2. Velocity contour dağılımı analiz sonuçları

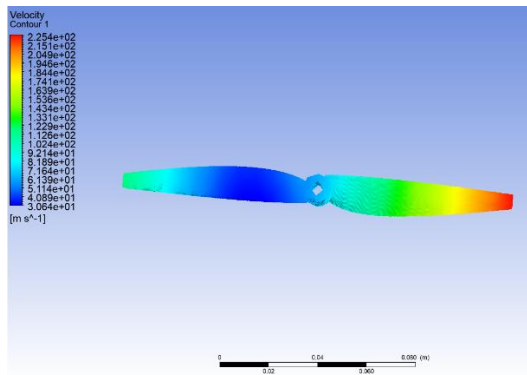


Şekil 3. Pressure contour dağılımı analiz sonuçları

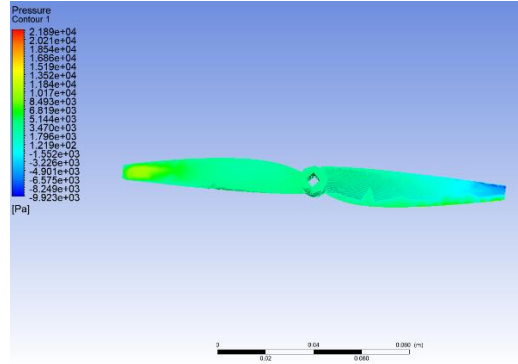
20000rpm'deki analiz sonuçları:



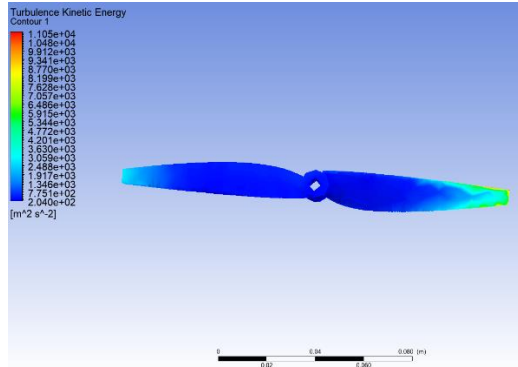
Şekil 4. Turbulence Kinetic Energy analiz sonuçları



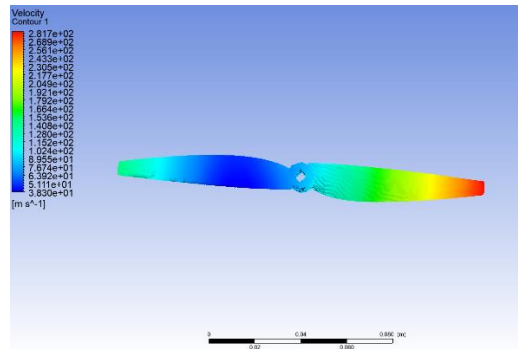
Şekil 5. Velocity contour dağılımı analiz sonuçları



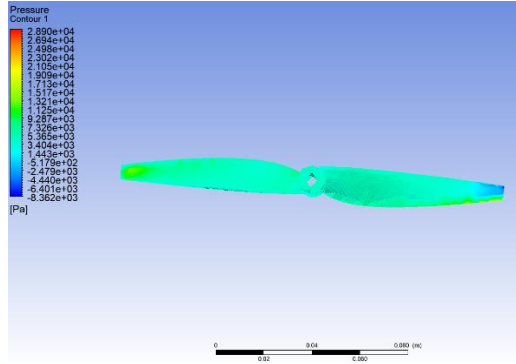
Şekil 6. Pressure contour dağılımı analiz sonuçları
25000rpm'deki analiz sonuçları



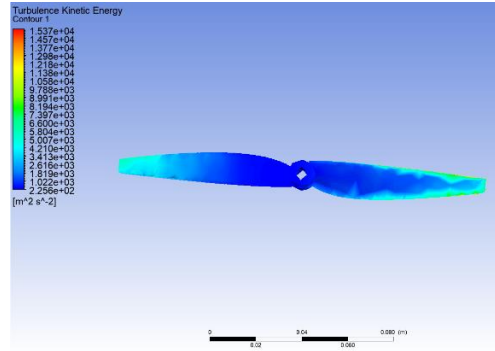
Şekil 7. Turbulence Kinetic Energy analiz sonuçları



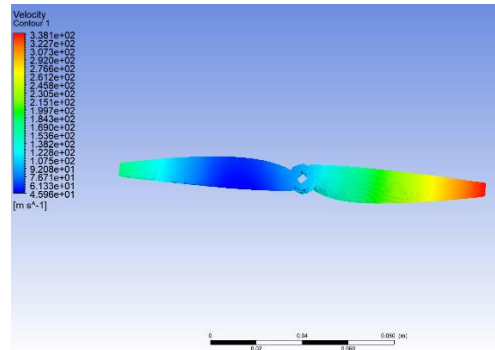
Şekil 8. Velocity contour dağılımı analiz sonuçları



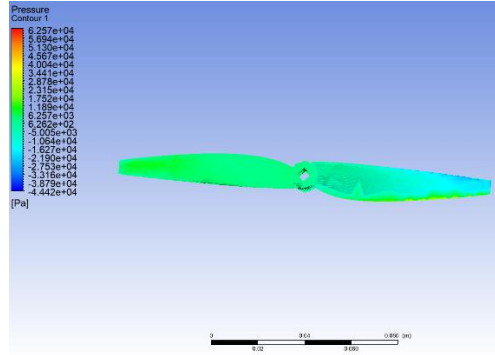
Şekil 9. Pressure contour dağılımı analiz sonuçları
30000rpm'deki analiz sonuçları



Şekil 10. Turbulence Kinetic Energy analiz sonuçları



Şekil 11. Velocity contour dağılımı analiz sonuçları



Şekil 12. Pressure contour dağılımı analiz sonuçları

Sonuç ve Öneriler

İHA pervane tasarımında malzeme seçimi artık sadece “hafif ve sağlam” olmaktan çok öteye geçmekte; doğrudan aerodinamik verimi belirleyen temel unsur haline gelebilmektedir. Yapılan CFD analizleri de bunu açıkça ortaya koymaktadır: Pervane devri arttıkça itişteki yükseliş gözle görülür bir hız kazanmaktadır. 15000 devirde kanat uçları neredeyse hareketsiz, basınç farkı zayıf ve itiş çok sınırlı kalmaktadır. 25000 devir civarında işler değişmeye başlıyor; emiş yüzeyindeki düşük basınç bölgesi genişliyor, uç hızları belirgin şekilde yükselişe geçmektedir. 30000 devirde ise tablo tamamiyle farklılaşmakta: Kanat uçlarında hız doruğa çıkıp, türbülans yoğunluğu artmakta ve emiş tarafındaki derin düşük basınç alanı itişci ciddi biçimde yukarı çekmektedir. Bu noktada verim eğrisi en üst seviyelerine yaklaşıp; daha fazla devir artışı getirirse de gürültü ve güç tüketimi de aynı oranda yükselmektedir. Dolayısıyla 30000 rpm civarı hem yüksek itiş hem de kabul edilebilir gürültü ve güç tüketimi açısından gerçek bir “tatlı nokta” olarak öne çıkabilmektedir. Yapılan hipotetik analiz, çelik pervane kullanımının yüksek RPM’lerde bile geometriyi koruduğunu ancak adaptif pitch avantajını ortadan kaldırarak verimi düşürebildiğini göstermektedir. Ayrıca ağırlık artışı nedeniyle enerji verimliliği ciddi oranda azalmaktadır. Bu sonuçlar, racing drone uygulamalarında neden

hafif kompozit malzemelerin tercih edildiğini sayısal olarak doğrulamakta ve gelecekteki malzeme optimizasyon çalışmalarına katkı sunmaktadır."

Sonuç olarak, pervane tasarımında yalnızca birkaç gramlık malzeme değişikliği, faydalı yük kapasitesinde yüzlerce gramlık artış ve uçuş süresinde dakikalar düzeyinde kazanç sağlayabilmektedir. Malzeme seçiminin aerodinamik etkileriyle birleştirilmiş, titizlikle yürütülmüş bir sayısal akışkanlar dinamiği analizleri, günümüzde insansız hava aracı performansını belirleyen temel unsur haline gelebilmektedir. Bu iki disiplinin eş zamanlı ve bilinçli kullanımı, artık bir tercih olmanın ötesinde, rekabetçi İHA tasarımı için vazgeçilmez bir zorunluluk niteliği taşımaktadır.

Kaynaklar

- [1] Kartal, M. A., & Feyzioğlu, A. (2025). Aerodynamic performance and energy modeling of a quadcopter drone at different RPM: An experimental and CFD investigation of future design UAV. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaf132>
- [2] Kutty, H. A., & Rajendran, P. (2017). 3D CFD simulation and experimental validation of small APC slow flyer propeller blade. *Aerospace*, 4(1), 10. <https://doi.org/10.3390/aerospace4010010>
- [3] Ahmad, F., Kumar, P., Patil, P. P., & Kumar, V. (2021). Design and modal analysis of a quadcopter propeller through finite element analysis. *Materials Today: Proceedings*, 46(Part 20), 10322–10328. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.457>
- [4] Rajendran, M., Arumugam, M., Sourirajan, L., Solaiappan, S. K., Bali, S. S., Arputharaj, B. S., Sakthivel, P., Singh, S., Vafaeva, K. M., & Raja, V. (2025). Multi-dimensional analysis of the hybrid profiled propeller of a pentacopter UAV: Aerodynamic, aero-acoustic, and structural parametric estimations utilizing synergistic engineering

approaches. *Results in Engineering*, 26, Article 104614.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104614>

[5] Dhinnesh, S., Guru, S., & Venkatesh, N. (2024). Design and analysis of UAV propeller for composite materials. *International Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH)*, 2, 20–26. <https://doi.org/10.47392/IRJAEH.2024.0004.i1>

[6] Tiruvenkadam, N., Shankar, S., Kumar, P., & Gowtham, S. (2024). Investigation of structural and thermal analysis of drone propeller materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 2925, 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2925/1/012002>

[7] Mishra, A., Pal, S., & Singh, P. (2022). Design and analysis of an eight rotor co-axial UAV using carbon fiber composites. *Materials Today: Proceedings*, 68(Part 4), 1011–1015. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.206>

[8] Carroll, T. (2023, 15 Mart). Reducing vibration in drones and thrust stands: Material selection guide. Tyto Robotics. <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/reducing-vibration-in-drones-and-test-stands>

[9] Brandt, J., & Selig, M. (2012). Propeller performance data at low Reynolds numbers. *Aerospace Sciences Meetings*. <https://doi.org/10.2514/6.2011-1255>

[10] Cruzatty, C., Sarmiento, E., Valencia, E., & Cando, E. (2022). Design methodology of a UAV propeller implemented in monitoring activities. *Materials Today: Proceedings*, 49(Part 1), 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.496>

[11] Raja, V., Raji, A. P., Madasamy, S. K., Bernard, F. A., Rameshbabu, V., Mathaiyan, V., & Kulandaiyapan, N. K. (2021). Investigations on selection of suitable propellers for high payload based unmanned aerial vehicles using advanced computational simulations. In *ASME 2021 Gas Turbine India Conference* (Vol.

85536, p. V001T05A001). ASME.
<https://doi.org/10.1115/GTINDIA2021-68678>

[12] Uzun, M., Çınar, H., Kocamer, A., & Çoban, S. (2023). Fluid-structure coupled simulation-based investigation and thrust/efficiency calculation for a UAV twin-blade propeller. *Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology*, 39(2), 183–191. <https://doi.org/10.47894/eujinst.1312660>

[13] Yoon, J., Lim, K., Park, S., & Lee, J. (2023). Multi-objective optimization of aerodynamic blade shapes for quadcopter system to enhance hovering thrust and power consumption efficiency. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 24(4), 689–700. <https://doi.org/10.1007/s42405-023-00600-9>

[14] He, M., Fan, W., Yin, X., Li, L., Liu, N., Mo, W., & Han, H. (2021). Comparison of propellers and reduction of vibration in four-rotor unmanned aerial vehicle (UAV). In D. Zhen, D. Wang, T. Wang, H. Wang, B. Huang, J. K. Sinha, & A. D. Ball (Eds.), *Proceedings of IncoME-V & CEPE Net-2020: Condition monitoring, plant maintenance and reliability* (pp. 514–522). Springer. (Mechanisms and Machine Science, Vol. 105). https://doi.org/10.1007/978-3-030-75793-9_48

[15] Hasegawa, M., & Sakaue, H. (2024). Propeller-noise reduction by microfiber coating on a blade surface. *Sensors and Actuators A: Physical*, 371, Article 115273. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115273>

GEÇİCİ KAPAK

*Kapak tasarımı
devam ediyor.*